

“FUENTES AZUFRADAS EN CULTIVOS DE GRANO DE LA REGIÓN PAMPEANA”

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias del Suelo

Martin Juan Jorge Torres Duggan

Ingeniero Agrónomo-FA-UBA, 1999.
Especialista en Fertilidad del Suelo y Fertilización-FA-UBA, 2004.
Lugar de trabajo: Tecnoagro S.R.L



**Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires**

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis
Mónica Beatriz Rodríguez
Ingeniera Agrónoma (FA-UBA)
Magister Scientiae (FA-UBA)
Dra. UBA (Ciencias Exactas y Naturales)

Consejero de Estudios
Raúl Silvio Lavado
Ingeniero Agrónomo (FA-UBA).

JURADO DE TESIS

Director de tesis
Mónica Beatriz Rodríguez
Ingeniera Agrónoma (FA-UBA)
Magister Scientiae (FA-UBA)
Dra. UBA (Ciencias Exactas y Naturales)

JURADO
Fernando Salvagiotti
Ingeniero Agrónomo (UNC)
Ph.D (University of Nebraska-Lincoln)

JURADO
Graciela Boschetti
Lic. Edaf. (UCSF)
Magister Scientiae (FA-UBA)

Fecha de defensa de tesis: 21 de MARZO de 2011

DEDICATORIA

Dedico el trabajo de tesis a la mujer de mi vida, Natalia, por el apoyo permanente e incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar un profundo agradecimiento:

- A Ricardo Melgar por el apoyo recibido para la realización de esta tesis y por su confianza de siempre.
- A Mónica Rodríguez por sus valiosos consejos y paciencia durante todo el proceso de preparación de la tesis y de la Maestría en general.
- A Raúl S. Lavado por la generosidad intelectual, apoyo y lectura crítica de las diferentes versiones del proyecto de tesis y de la tesis definitiva.
- A Tecnoagro S.R.L, por apoyarme en el desafío de realizar la Maestría.
- A Luis y Javier Lavandera y a María Elena Camozzi, por su colaboración en la ejecución de los ensayos.
- A Honeywell, Ltd. Sulferworks (Canadá) y IMC, Inc. por al apoyo financiero para la realización de los experimentos.
- A los miembros de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes (FA-UBA).
- A Esteban Ciarlo por su asesoramiento en el análisis estadístico.
- A Ignacio Ciampitti por su apoyo en el análisis estadístico en gráficos.
- Al personal del INTA por haberme facilitado información climática, en especial a la Sra. Graciela Cazenave (INTA).
- A la Asociación Civil Fertilizar (ACF) y en especial a María Fernanda González Sanjuán por al apoyo para exponer los resultados de la tesis en el Congreso Mundial de Suelos (Brisbane, Australia, 2010).
- A Graeme Blair por facilitarme valiosas publicaciones sobre azufre elemental.
- A la familia, en especial a Mabel, Jacqueline, Héctor, Manuel, por confiar en mis proyectos y brindarse incondicionalmente.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

Torres Duggan, M., Rodríguez, M.B; Lavado, R.S; Melgar, R. 2010. Eficiencia agronómica del azufre elemental relativa a una fuente azufrada soluble en trigo en la Región Pampeana. Ciencia del Suelo. 28 (1). 67-77.

Torres Duggan, M., Rodríguez, M.B., Lavado, R., Melgar, R. Effect of elemental and soluble sulphur sources on grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in Mollisols of Pampas Region of Argentina. 19th Word Congress of Soil Science. Brisbane, Australia. 2010. Publicado en DVD.

Torres Duggan, M., Rodríguez, M.B., Lavado, R., Melgar, R. A review of sulphur fertilizer use and technology management in Pampas Region of Argentina. 19th Word Congress of Soil Science. Brisbane, Australia. 2010. Publicado en DVD.

Torres Duggan, M; Rodríguez, M.B. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. En: Simposio Fertilidad 2009. Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de Cultivos. IPNI Cono Sur y Fertilizar Asociación Civil. García F.O.; Ciampitti, I.A. (editores). ISBN: 978-987-24977-1-2. 224-233 p.

INDICE GENERAL

	Página
Resumen	12
Abstract	14
Capítulo 1: Antecedentes y objetivos.	
1.1. El azufre y su rol en la naturaleza	16
1.1.1. Funciones e importancia en la nutrición y producción vegetal	16
1.1.2. Deficiencias de azufre y respuesta de los cultivos	16
1.2. Contenido, formas y ciclo biogeoquímico del azufre en el suelo	18
1.3. Fuentes azufradas	21
1.3.1. Clasificación y fuentes azufradas utilizadas en la Argentina	21
1.3.2. Propiedades físico-químicas de fuentes azufradas	23
1.3.3. Oxidación del azufre elemental y factores reguladores	24
1.4. Disponibilidad de S y efectividad agronómica	26
1.4.1. Influencia de propiedades físico-químicas de fuentes azufradas en respuesta a la fertilización	26
1.4.2. Influencia de variables climáticas sobre la eficiencia de las fuentes azufradas	27
1.5. Objetivo general de la tesis	29
1.6. Estructura de la tesis	29
1.7. Bibliografía	29
Capítulo 2: Materiales y métodos generales	
2.1. Introducción	35
2.2. Descripción del área de estudio	35
2.3. Caracterización y ubicación de los sitios experimentales	38
2.4. Tratamientos y diseño experimental	40
2.5. Muestreos y determinaciones en suelo y planta	41
2.6. Registro de datos climáticos	41
2.7. Análisis estadístico	41
2.8. Bibliografía	41
Capítulo 3: Efectos directos de la fertilización en trigo y soja de primera	

3.1. Introducción	45
3.2. Interrogantes	46
3.3. Objetivo	46
3.4. Hipótesis	46
3.5. Materiales y métodos específicos	47
3.5.1. Características de sitios experimentales	47
3.5.2. Tratamientos y diseño experimental	48
3.5.3. Análisis estadístico	49
3.5.4. Muestreos y determinaciones en suelo y planta	49
3.6. Resultados y Discusión	50
3.6.1. Experimentos de trigo	50
3.6.1.1. Características climáticas de los años evaluados	50
3.6.1.2. Rendimiento y respuesta a la fertilización azufrada	52
3.6.1.3. Relación entre las respuestas a la fertilización y variables edafo-climáticas.	53
3.6.1.4. Efectos de fuente y dosis	55
3.6.2. Experimentos de soja de primera	58
3.6.2.1. Características climáticas de los años evaluados	58
3.6.2.2. Rendimientos y respuesta a la fertilización azufrada	61
3.6.2.3. Relación entre las respuestas a la fertilización y variables edafo-climáticas.	62
3.6.2.4. Efectos de fuente y dosis	66
3.6.3. Eficiencia comparada de las fuentes azufradas en los ciclos de trigo y soja de primera	68
3.7. Consideraciones finales	71
3.8. Bibliografía	71

Capítulo 4: Influencia de la fuentes azufradas en la residualidad de la fertilización.

4.1. Introducción	77
4.2. Interrogantes	78
4.3. Objetivo	78
4.4. Hipótesis	78
4.5. Materiales y métodos específicos	78
4.5.1. Características de sitios experimentales	78
4.5.2. Tratamientos y diseño experimental	79
4.5.3. Análisis estadístico	79
4.5.4. Muestreos y determinaciones en suelo y planta	79
4.5.5. Registro de información climática	80
4.6. Resultados y Discusión	80
4.6.1. Características climáticas de los años evaluados	80
4.6.2. Rendimientos y residualidad de la fertilización azufrada	82
4.6.3. Relación entre las respuestas y variables edafo-climáticas	83
4.6.4. Efecto de tratamiento, fuente y dosis.	84
4.6.5. Eficiencia agronómica de fuentes azufradas	87
4.7. Consideraciones finales	89
4.8. Bibliografía	89

Capítulo 5: Conclusiones

92

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Capítulo 1: Antecedentes y objetivos	
1.1. Principales fuentes azufradas utilizadas en la agricultura	22
Capítulo 2: Materiales y Métodos generales	
2.1. Características edáficas y fisiográficas de los sitios experimentales.	39
2.2. Latitud y longitud de los sitios experimentales.	40
Capítulo 3: Efectos directos de la fertilización en trigo y soja de primera.	
3.1. Principales variables de fertilidad de sitios experimentales.	47
3.2. Información agronómica general de los sitios experimentales.	48
3.3. Solubilidad en agua de fuentes azufradas utilizadas en los experimentos.	48
3.4. Rendimientos medios de trigo (kg ha^{-1}) del tratamiento sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S.	52
3.5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha^{-1}) al agregado de S y variables edafo-climáticas.	54
3.6. Coeficientes de determinación lineal y bondad de ajuste (R^2) de ecuaciones de regresión lineal simple entre las respuestas a S y el contenido de S-SO_4^{2-} (mg kg^{-1}) en el suelo en el estrato de 0-20 cm.	54
3.7. Rendimiento en grano de trigo (kg ha^{-1}) para los diferentes tratamientos de fertilización.	56
3.8. Resumen de análisis de la varianza (valor p) para los factores fuente, dosis y fuente x dosis en los dos años de experimentos.	56
3.9. Contrastes ortogonales expresados en kg ha^{-1} (SA-AE) para los diferentes sitios experimentales.	57
3.10. Rendimientos medios (kg ha^{-1}) del tratamiento sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S.	61
3.11. Coeficientes de determinación lineal y bondad de ajuste (R^2) de ecuaciones de regresión lineal simple entre las respuestas a S y el contenido de S-SO_4^{2-} (mg kg^{-1}) en el suelo en el estrato de 0-20 cm, en el primer año de ensayos.	62
3.12. Coeficientes de determinación lineal y bondad de ajuste (R^2) de ecuaciones de regresión lineal simple entre las respuestas a S y el contenido de S-SO_4^{2-} (mg kg^{-1}) en el suelo en el estrato de 0-20 cm, en el segundo año de ensayos.	66
3.13. Rendimiento en grano de soja de primera (kg ha^{-1}) para los diferentes tratamientos de fertilización.	66
3.14. Resumen del análisis de la varianza (valor p) para los factores fuente, dosis y fuente x dosis de los dos años de experimentos.	67

3.15.	Contrastes ortogonales expresados en kg ha^{-1} (SA-AE) para los diferentes sitios experimentales.	68
3.16.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) de experimentos de trigo (primer año).	69
3.17.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) de experimentos de trigo (segundo año).	69
3.18.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) de experimentos de soja de primera (primer año).	69
3.19.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) de experimentos de soja de 1ra (segundo año).	70
3.20.	Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y precipitación acumulada (mm) en trigo y soja de primera.	70

Capítulo 4: Influencia de la fuente azufrada en la residualidad de la fertilización.

4.1.	Fechas de siembra y genotipos de soja utilizados en los experimentos.	78
4.2.	Contenido de S-SO_4^{2-} (mg kg^{-1}) al inicio del cultivo de soja de segunda en los tratamientos testigo.	79
4.3.	Rendimiento medio (kg ha^{-1}) de tratamiento sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S.	82
4.4.	Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha^{-1}) al agregado de S y variables edafo-climáticas integrando los dos años de experimentos.	83
4.5.	Rendimiento en grano de soja de segunda (kg ha^{-1}) para los diferentes tratamientos de fertilización.	84
4.6.	Resumen del análisis de la varianza (valor p) para los factores fuente, dosis y fuente x dosis, en sitios con efecto significativo de tratamiento ($p < 0,05$), durante el primer año de ensayos.	85
4.7.	Resumen del análisis de la varianza (valor p) para los factores fuente, dosis y fuente x dosis, en sitios con efecto significativo de tratamiento ($p < 0,05$), durante el segundo año de ensayos.	85
4.8.	Contrastes ortogonales (SA-AE) para los diferentes sitios experimentales.	86
4.9.	Componentes del balance de S y estimación del S remanente aparente al final del ciclo de trigo. Primer año de ensayos.	86
4.10.	Componentes del balance de S y estimación del S remanente aparente al final del ciclo de trigo. Segundo año de ensayos.	87
4.11.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) en experimentos de soja de segunda (primer año).	88
4.12.	Eficiencia de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) en experimentos de soja de segunda (segundo año).	88

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Capítulo 1: Antecedentes y objetivos	
1.1. Distribución de las áreas con deficiencias de S en la Región Pampeana.	17
1.2. Evolución del consumo aparente de S en la Argentina.	18
1.3. Ciclo del S en agro-ecosistemas.	20
1.4. Consumo de azufre elemental en diferentes regiones del mundo y proyecciones a 2011 y 2016.	23
1.5. Clasificación de fuentes azufradas según solubilidad en agua y reactividad en el suelo.	24
1.6. Diagrama de relaciones entre las variables independientes (Xn) y dependientes (Y) que inciden en la oxidación del azufre elemental a sulfato.	25
1.7. Precipitaciones acumuladas en el semestre frío (a) y cálido (b) en la Región Pampeana argentina.	28
Capítulo 2: Materiales y Métodos generales	
2.1. Principales regiones agro-ecológicas de la Argentina. La Región Pampeana corresponde al color celeste (“Humid Pampa”).	35
2.2. Ubicación de los sitios experimentales. Los círculos rojos corresponden a los sitios experimentales. A: Pampa Ondulada. B: Pampa Plana.	36
2.3. Porcentaje de distribución de las precipitaciones para cada semestre del año.	37
Capítulo 3: Efectos directos de la fertilización en trigo y soja de primera.	
3.1. Precipitación media mensual en los sitios experimentales.	50
3.2. Temperatura media mensual en los sitios experimentales.	51
3.3. Precipitación acumulada (mm, barbecho y ciclo del cultivo) y uso consuntivo de agua (estimado).	52
3.4. Relación entre la respuesta al agregado de S (fuentes y dosis integradas) y el contenido de SO_4^{2-} en el suelo (0-20 cm).	55
3.5. Precipitación media mensual. a: año 1. b: año 2.	59
3.6. Temperatura media mensual para los dos años de experimentos.	60

3.7.	Precipitación acumulada (mm, barbecho y ciclo del cultivo) y uso consuntivo de agua (estimado).	61
3.8.	Relación entre la respuesta al agregado de S (fuentes y dosis integradas) y el contenido de SO_4^{2-} en el suelo (0-20 cm).	65
3.9.	Distribución de precipitación (líneas) y déficit mensual de agua en relación a la serie climática (0=media). Sitio Fuentes (año 2).	68

Capítulo 4: Influencia de la fuente azufrada en la residualidad de la fertilización.

4.1.	Precipitación media mensual durante el ciclo del cultivo en cada sitio experimental. a: año 1. b: año 2.	81
4.2.	Temperatura media mensual durante el ciclo del cultivo en cada sitio experimental. a: año 1. b: año 2.	82
4.3.	Relación entre las respuestas al agregado de S y el contenido de S remanente al inicio de la soja de 2da (0-20 cm).	83

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivos: i. Evaluar la incidencia de la solubilidad y forma química de fuentes azufradas (azufre elemental y una fuente sulfatada soluble) en las respuestas en el rendimiento de trigo y soja de primera. ii. Analizar la residualidad de la aplicación de las fuentes azufradas en el trigo en el rendimiento de la soja de segunda. Asimismo, como objetivo secundario se planteó evaluar la influencia de variables edáficas y climáticas en las respuestas observadas. Se plantearon dos hipótesis: i. La necesidad de oxidación del azufre elemental (AE) reduce la respuesta y eficiencia de uso del S (EUS) en el cultivo de trigo, comparado con el sulfato de amonio (SA). Por el contrario, ese efecto es de menor magnitud en soja de primera, debido a las condiciones termo-hídricas más favorables. ii. La residualidad de la fertilización del trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda, es mayor con el AE micronizado que con el SA. Se realizaron ocho ensayos de campo en trigo/soja 2da y nueve en soja de 1ra, durante dos años consecutivos en sitios ubicados en la Región Pampeana. Los tratamientos fueron: i. testigo (sin agregado de S), ii. fertilización con azufre elemental (AE) micronizado (0-0-0+95% de S) en dos niveles de dosis, iii. fertilización con sulfato de amonio granulado (SA, 21-0-0+ 24% S), también en dos niveles de dosis. Las dosis evaluadas fueron 10 y 30 kg ha⁻¹ de S (año 1) y 15 y 30 kg ha⁻¹ (año 2). La fertilización azufrada afectó significativamente ($p<0,05$) los rendimientos del trigo en cuatro de cinco sitios en el primer año y en todos los sitios durante el segundo año. Las respuestas se ubicaron en el rango de 231 a 857 kg ha⁻¹ en el primer año y entre 702 y 2119 kg ha⁻¹ en el segundo año. No se observaron diferencias en respuesta entre fuentes azufradas (i.e. similar efectividad) o en la eficiencia agronómica del S aplicado (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) en la mayoría de los sitios. Para el conjunto de experimentos, ambos fertilizantes fueron adecuados para proveer SO₄²⁻ al cultivo. Estos resultados permitieron rechazar la hipótesis planteada. Tampoco se detectó efecto significativo de dosis o interacción fuente x dosis en la mayoría de los sitios ($p>0,05$). La dosis más baja fue suficiente para cubrir la demanda de S del cultivo. Se observó una asociación positiva entre las respuestas y el contenido de MO del suelo y las precipitaciones (macollaje y total del ciclo) e inversa con la disponibilidad de S-SO₄²⁻ a la siembra, aunque con bajo ajuste (R^2 medio=0,18). No se detectó asociación entre las respuestas y la temperatura en macollaje o en el ciclo. En los experimentos con soja de 1ra, se observó una baja frecuencia de sitios con respuesta a la fertilización azufrada. En estos sitios, las respuestas fueron de 377-982 kg ha⁻¹ (año 1) y de 151-361 kg ha⁻¹ (año 2) y no se evidenció correlación significativa entre las respuestas y variables climáticas o edáficas en el primer año de evaluación. En el segundo año, las respuestas se correlacionaron en forma inversa con el contenido de S-SO₄²⁻ inicial ($R^2=0,63$). La eficiencia agronómica del S aplicado fue similar entre las fuentes azufradas durante el primer año y se observó efecto significativo de dosis. La dosis más alta fue más eficiente en proveer S al cultivo. En el segundo año, dependiendo de la localidad, se observaron algunas diferencias de efectividad entre las fuentes azufradas relacionadas con la influencia de variables de sitio. Los efectos residuales en la soja de 2da se observaron en pocos sitios experimentales. Las respuestas fueron de 58-689 (año 1) y de 186-512 kg ha⁻¹ (año 2) y se pudieron asociar en forma inversa con el contenido de S-SO₄²⁻ estimados al inicio del cultivo ($R^2=0,33$). En los sitios con residualidad significativa ($p<0,05$) y con la menor dosis de S aplicada en el trigo antecesor, no se observaron diferencias significativas

($p > 0,05$) en eficiencia agronómica entre fuentes. Por el contrario, con la dosis mas elevada, la eficiencia del S aplicado como AE fue mayor que con SA. Por ello, la hipótesis planteada en el tema de residualidad se acepta, pero parcialmente. Los resultados obtenidos no permitieron determinar un patrón claro de residualidad de las fuentes azufradas en los sitios experimentales.

Palabras Clave: azufre, azufre elemental, residualidad, fuentes azufradas.

ABSTRACT

The thesis aims to: i. Evaluate the influence of different sulphur (S) sources (elemental sulphur and a sulphate fertilizer) on grain yield responses in wheat and full season soybean. ii. Analyze the residual effects of S wheat fertilization on the followed soybean (second soybean). As a secondary objective, it was the relationship between yield responses and soil and climate variables. Two hypotheses were defined: i. The oxidation requirements of elemental sulphur (AE) reduce wheat yield response to S fertilization and sulphur agronomic efficiency (SAE) compared to ammonium sulphate. By contrast, the differences between S sources are less, because of better environmental conditions (rainfalls and highest temperature). ii. Sulphur residual effects of wheat fertilization are higher with micronized AE than ammonium sulphate. Eight field experiments were performed in wheat/soybean (double crop) and nine in full season soybean, during two consecutive years. Experiments were carried on farming systems of Pampas region. The treatments were: i. check (without S application), ii. fertilization with a micronized source of elemental sulphur (AE, 0-0-0+95% of S), iii. fertilization with ammonium sulphate (21-0-0+SA, 24%). The S rates were 10 and 30 kg ha⁻¹ of S (first year) and 15 and 30 kg ha⁻¹ of S (second year). There has been detected a significant fertilization effect ($p < 0,05$) in four of the five sites in wheat (first year) and in all sites during the second year. Yield grain responses were in the range of 231-857 kg ha⁻¹ and 702-2119 kg ha⁻¹ (first and second year, respectively). In most sites, S sources presented similar agronomic effectiveness (yields responses) and efficiency (kg of grain kg of S⁻¹). There was not observed significant S rate effect. Lower S rate was enough to provide S to the crop. Grain yield responses to S were positively correlated with OM content and rainfalls (tillering or whole crop cycle) and negatively associated with SO₄²⁻ at planting. However, statistical adjustment was poor ($R^2 = 0,18$). There was not observed any correlation between S responses and temperature both during tillering or whole crop cycle. There were only few sites where soybean responses were significant. In these sites, yield responses ranged from 377 to 982 kg ha⁻¹ (year 1) and from 151 to 361 kg ha⁻¹ (year 2). There was not observed correlation between such responses with climate or soil variables. However, In the second year, an inverse relationship between S responses and S-SO₄²⁻ concentration in the soil ($R^2 = 0,63$) were found. Agronomic efficiencies between S sources were similar during the first year, with significant S rate effect. The highest S rate was more efficient to provide S to the crop. During second year of experiments there were observed some differences among S sources depending on the site, probably associated with local factors. Regarding to S residual effects on second soybean, only few sites presented significant responses. Grain yield responses were 58-689 (year 1) and 186-512 kg ha⁻¹ (year 2). These yield responses were inversely associated to S-SO₄²⁻ in soil ($R^2 = 0,33$). In those sites where residual effects were observed and for the lowest S rate applied in previous wheat, there was not detected differences in agronomic efficiency ($p > 0,05$) among S sources. Conversely, with highest S rate, agronomic efficiency was highest with AE than SA. These results don't show a clear behavior between S sources in terms of its residual effects.

Key Words: sulphur, elemental sulphur, agronomic effectiveness, sulphur sources.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1.- EL AZUFRE Y SU ROL EN LA NATURALEZA

1.1.1.-Funciones e importancia en la nutrición y producción vegetal

El azufre (S) constituye un nutriente esencial para la nutrición vegetal, con requerimientos similares a los de fósforo (P), aunque considerablemente más bajos que nitrógeno (N) y potasio (K). El S participa en importantes procesos bioquímicos y fisiológicos en las plantas superiores como la biosíntesis de proteínas y lípidos, fotosíntesis, asimilación de N, fijación biológica de N, entre otras (Mengel y Kirkby, 2000; Rice, 2007). Las raíces absorben S como SO_4^{2-} y se reduce dentro de la planta durante la síntesis de compuestos orgánicos. A diferencia de lo que ocurre con el N, el S presenta escasa movilidad dentro de la planta, determinando que los síntomas de deficiencia se observen en las hojas más nuevas.

La concentración de S en tejidos vegetales varía considerablemente según la familia y especie botánica y se encuentra asociado con el requerimiento fisiológico (Haneklaus *et al.*, 2000). En general, las gramíneas presentan menor concentración de S en tejidos que las dicotiledóneas. El índice de cosecha medio del S (i.e., proporción del S en grano en relación a la biomasa total) es más bajo que para N o P. El requerimiento y extracción de S en base seca es 5, 4 y 5 kg de S por Mg de grano y 2, 1 y 4 kg de S por Mg grano, para trigo, maíz y soja, respectivamente (Ciampitti & García, 2007).

Una reciente revisión sobre la influencia de la fertilización sobre la calidad nutricional de diversos cultivos, indica importantes efectos del S en la calidad de cereales, oleaginosas y hortalizas (Wang *et al.*, 2008). En trigo, la deficiencia de S reduce la concentración de aminoácidos azufrados (e.g. cistina y metionina) y consecuentemente la calidad panadera; mientras que en soja los efectos se observan principalmente en la variación en la concentración y relación entre las proteínas que constituyen el grano (e.g. glicinina y conglucina). En cambio en maíz, el conocimiento de la influencia de la fertilización azufrada sobre la calidad de grano es aún poco concluyente. Sin embargo, considerando que los granos contienen una elevada concentración de aminoácidos azufrados, se considera que una baja disponibilidad de S podría reducir su calidad (Wang *et al.*, 2008). El S también tiene un rol muy importante en la reducción de la incidencia y severidad de enfermedades, principalmente las de origen fúngico (Haneklaus *et al.*, 2007).

1.1.2.- Deficiencias de S y respuesta de los cultivos

Las deficiencias de S comenzaron a manifestarse y difundirse a nivel global hace relativamente pocos años, en regiones donde hasta hace poco tiempo la disponibilidad de este nutriente resultaba suficiente. Las principales razones son: a) las regulaciones ambientales sobre las emisiones de SO_2 , b) el incremento en la aplicación de fertilizantes con alto grado y bajo contenido de S, c) el aumento en los rendimientos debido al uso de distintas tecnologías (Eriksen, 2005). Estimaciones efectuadas por el Instituto Internacional del Azufre basadas en la demanda de S de los cultivos, indican que la deficiencia de S global es de alrededor de 9,6 billones de Mg anuales y se proyecta un déficit de 11,9 millones para el 2015 (Fan & Messick, 2007).

En la Argentina, la fertilización azufrada comenzó a difundirse hace pocos años, comenzando en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe. Inicialmente se observó en colza (Rubio *et al.* 1996) y posteriormente se verificaron deficiencias y respuestas al agregado de S en soja, trigo y maíz, en lotes con prolongada historia agrícola, bajos contenidos de MO y siembra directa (Echeverría, 2005; Gutiérrez Boem, 2006). Desde hace algunos años, las deficiencias de S comenzaron a observarse en otros ambientes edáficos ubicados en varias localidades del norte, centro y oeste de Buenos Aires y Entre Ríos (Darwich, 2005, Figura 1.1).

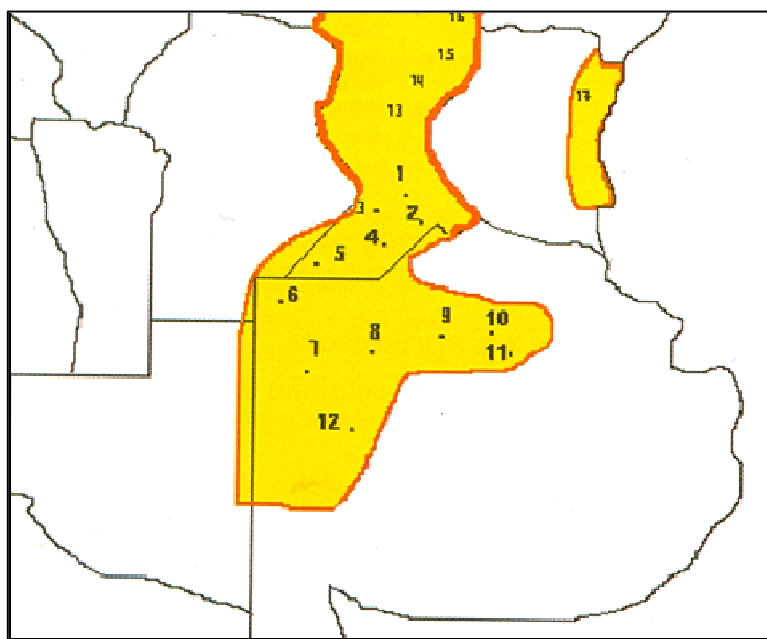


Figura 1.1. Distribución de las áreas con deficiencias de S en la Región Pampeana de Argentina. Los números corresponden a localidades (Darwich, 2005).

La progresiva aparición de áreas con deficiencias de S determinó que se comenzara a incorporar el S dentro de los programas de fertilización. Así, considerando el promedio de los principales cultivos de la Región Pampeana (i.e. soja, trigo, maíz y girasol), la reposición del S exportado por las plantas en los granos creció en los últimos años del 5% en 1998 a cerca del 30% en 2007, (IPNI, 2007). El menor costo de los fertilizantes azufrados en relación a los nitrogenados y fosfatados, posiblemente representó una variable importante para el crecimiento de la fertilización azufrada. También fue importante la tarea de difusión y transferencia de conocimiento llevada a cabo por organizaciones como INTA, AAPRESID, AACREA y Universidades, entre otras. En la 1.2 se presenta la evolución del consumo aparente de S en la Argentina.

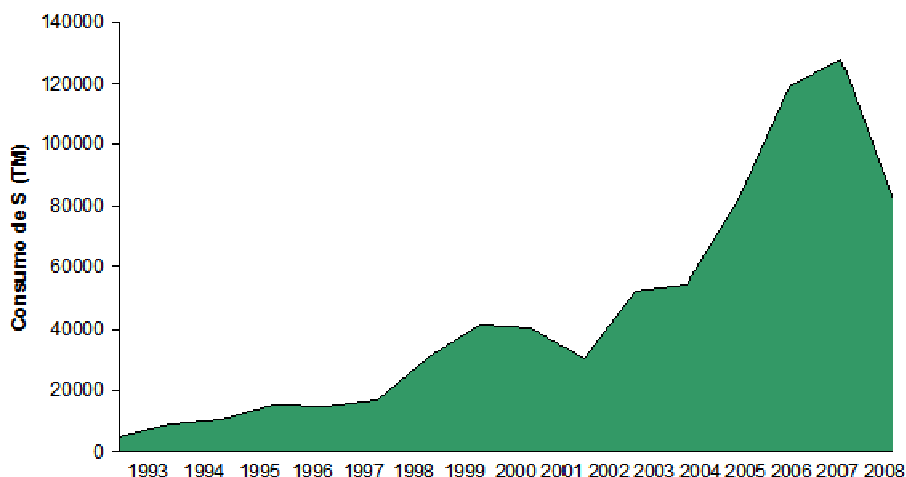


Figura 1.2 Evolución del consumo aparente de S en la Argentina (IPNI Cono Sur en base a datos de Fertilizar AC).

Las respuestas medias a la fertilización azufrada en la Región Pampeana, son de 200-500 kg ha⁻¹ en trigo y soja, y de 400-700 kg ha⁻¹ de grano en maíz (FAO, 2004). El diagnóstico de la fertilidad azufrada en suelos pampeanos es un tema que está en desarrollo quedando aún aspectos centrales sin dilucidar. Esto es debido a las dificultades en establecer relaciones significativas y estables entre las respuestas a la fertilización y el contenido de S-SO₄²⁻ en suelo a la siembra, para una amplia gama de condiciones edafo-climáticas. Sin embargo, existen algunos estudios puntuales que resultan alentadores. Así, una reciente y extensa red de experimentos de fertilización azufrada a campo llevada a cabo en 22 sitios del sur de Santa Fe durante cuatro campañas permitió establecer un umbral tentativo de 10 ppm de S-SO₄²⁻ (0-20 cm) para separar situaciones con y sin respuesta al agregado de S en trigo y soja de segunda (García *et al.*, 2006). En la soja de segunda, se pudo establecer la relación entre las respuestas a la fertilización y el contenido de S-SO₄²⁻ (0-20 cm) medido a la siembra del trigo precedente.

Las dificultades para establecer relaciones estables entre las respuestas y el contenido de S-SO₄²⁻ a la siembra de los cultivos obedecen a diferentes causas. Entre ellas, la presencia de S-SO₄²⁻ por debajo de la profundidad de muestreo o en el agua de capas freáticas cercanas; errores en la determinación de la concentración de S-SO₄²⁻ en los extractos de suelo (Gutiérrez Boem, 2006).

1.2.- CONTENIDO, FORMAS Y CICLO BIOGEOQUÍMICO DEL AZUFRE EN EL SUELO.

El rango típico de concentración total de S en suelos agrícolas de regiones húmedas y sub-húmedas es 0,1- 0,5 g kg⁻¹. Contenidos menores, del orden de 0,02 g kg⁻¹, se pueden encontrar en suelos muy meteorizados de zonas húmedas. Valores más elevados (35 g kg⁻¹) son frecuentes en suelos con aportes de origen marino, y de hasta 50 g kg⁻¹ en suelos calcáreos y salinos de zonas áridas y semiáridas (Haneklaus *et al.*, 2007). El S se encuentra en el suelo como SO₄²⁻ en la solución, SO₄²⁻ adsorbidos en la fase sólida, minerales con azufre y en la materia orgánica (MO). En regiones húmedas y

sub-húmedas, más del 95% del S total es de naturaleza orgánica (Tabatabai, 2005). La forma biodisponible corresponde a los SO_4^{2-} en solución, cuya concentración varía desde $<2 \text{ mg de S kg}^{-1}$ en suelos cultivados de regiones húmedas y subhúmedas a más de $1000 \text{ mg de S kg}^{-1}$ en zonas áridas y semiáridas.

La comprensión de la naturaleza y propiedades de las formas orgánicas de S en suelos resulta muy relevante, debido a que las mismas gobiernan la liberación de S disponible para los cultivos. Existen diversos enfoques para realizar fraccionamientos de S orgánico: extracción química seguida de separación físico-química en ácidos húmicos, fúlvicos y huminas; separación física a través de tamaño de fracciones organo-minerales y fraccionamientos moleculares (Haneklaus *et al.* 2007). Si bien gran parte de los compuestos orgánicos edáficos continúan sin identificarse, de acuerdo con Tabatabai (2005), es posible mencionar tres grupos de compuestos orgánicos azufrados:

- a) Compuestos con S que no está directamente unido con el carbono (C) y corresponderían a ésteres de sulfatos con uniones C-O-S (e.g., arilsulfatos, sulfato fenólico, polisacáridos sulfatados, entre otros). Otros compuestos orgánicos podrían estar presentes como sulfamatos (C-N-S) y tioglucósidos sulfatados (N-O-S). Esta fracción puede representar entre 30 y 60% del S total orgánico, con una media del 50%, en suelos de regiones húmedas y subhúmedas.
- b) Compuestos con S directamente unido a C (C-S). Esta fracción correspondería en gran medida a S en forma de aminoácidos como metionina, cistina y cisteína. La concentración en suelo varía entre 10 y 30% del S orgánico total, pero se han reportado valores de hasta 58% en suelos de Québec (Tabatabai, 2005).
- c) Compuestos con S no reducido por los reactivos utilizados en la estimación de las fracciones a y b. Esta fracción se ubica en el rango de 30 a 40% del S orgánico total. Considerando su gran resistencia a la degradación química, es una fracción de escaso valor como fuente de S disponible para las plantas.

En la Argentina, son escasos los estudios publicados sobre dinámica del S en el suelo, especialmente la que se refiere a la caracterización de formas químicas. Un trabajo relevante con este objetivo lo constituye el efectuado por Mizuno *et al.*, (1990) quienes analizaron muestras superficiales y perfiles de suelos de diferente desarrollo morfológico en ambientes de la Región Pampeana. Los valores de S total variaron entre 205 y 363 mg kg^{-1} en horizontes superficiales. El S reducible con ácido yodhídrico varió alrededor del 50% del S total, mientras que el S orgánico superó el 97% con proporciones variables de S de ésteres y S unido a C. La concentración de las diferentes formas fue mayor en Argiudoles que en Hapludoles. En general, la concentración de las distintas fracciones de S disminuyó en profundidad. Asimismo, estos autores observaron una elevada correlación entre el S total y el C orgánico y entre el S total y el P orgánico. La relación C/S fue inferior a 100, disminuyendo en profundidad. El S total se relacionó en forma inversa con el pH de los horizontes estudiados. Trabajos más recientes efectuados por Galantini *et al.* (2008) indicaron escasa variación en los contenidos de C, H y O en ácidos húmicos de suelos con diferentes texturas, aunque variaron los contenidos de N y S. Esto determinó cambios relevantes en las relaciones C:N, C:S y N:S.

El conocimiento del ciclo biogeoquímico del S en los agro-ecosistemas resulta de gran utilidad en estudios agronómicos, ya que ofrece un marco conceptual adecuado para las intervenciones que puede hacer el hombre a través del manejo de la fertilización. El ciclo del S en el sistema suelo-planta está gobernado por procesos biológicos y físico-químicos, con activa participación de la biota del suelo (Haneklaus *et al.*, 2007). En la Figura 1.3 se muestra un esquema del ciclo biogeoquímico del S en el suelo.

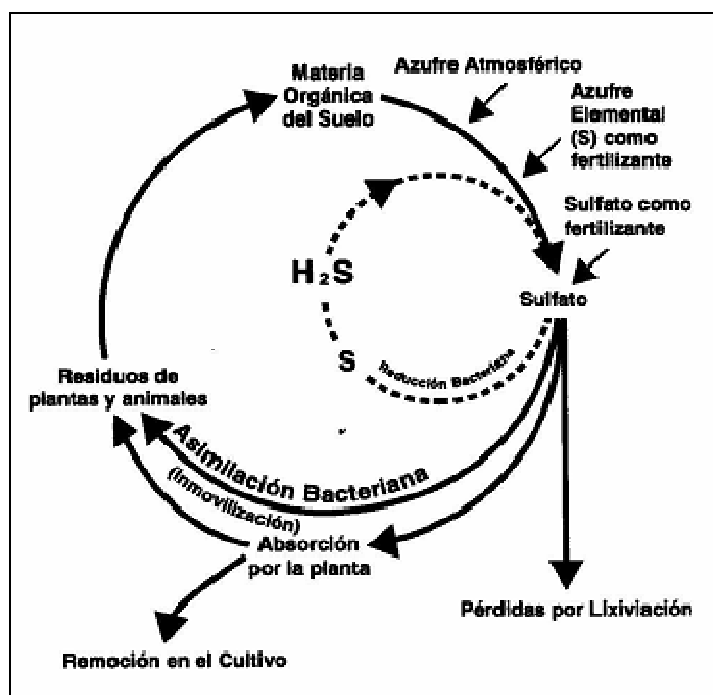


Figura 1.3. Ciclo del S en agro-ecosistemas (IPNI, 1997).

La fertilización con S ya sea en forma de SO_4^{2-} o como S^0 representa el principal ingreso de S en suelos agrícolas no regados de la Región Pampeana. El riego y las capas freáticas pueden ser fuentes importantes de $S-SO_4^{2-}$ para los cultivos. La contribución de las formas gaseosas de S es poco significativa en áreas alejadas de centros urbanos, industriales o distantes del mar. Las principales pérdidas o salidas de S de los agro-ecosistemas corresponden a la remoción por los productos cosechados, lixiviación y escurrimiento. La adsorción y las pérdidas gaseosas desde la superficie del suelo o desde las plantas presentan menor relevancia (Haneklaus *et al.*, 2000). Los principales biogeo Ciclos internos del S en suelos son la mineralización-inmovilización y la oxidación.

La mineralización es el proceso por el cual el S presente en las fracciones orgánicas edáficas se transforma en SO_4^{2-} biodisponible para las plantas. En el caso del S y a diferencia de lo que ocurre con el N, es posible diferenciar dos mecanismos de mineralización: mineralización biológica y mineralización bioquímica (Anderson *et al.*, 2006, Haneklaus *et al.*, 2007). La mineralización biológica de S está determinada por la demanda microbiana de C para proveer energía para su crecimiento, liberando SO_4^{2-} como subproducto de la oxidación del C a CO_2 . La transformación se realiza principalmente a través de microorganismos, por lo cual los factores que afectan la actividad microbiana (e.g. temperatura, humedad, pH y disponibilidad de sustrato) también influyen en los procesos de mineralización, inmovilización, oxidación y

reducción. Este proceso es similar a la mineralización del N. La mineralización bioquímica, en cambio, implica la liberación de SO_4^{2-} desde el pool de sulfato-ésteres como resultado de una hidrólisis enzimática. La arilsulfatasa es la principal enzima catalizadora en suelos. El “pool” de éster sulfato (S-O) tiene importancia en la mineralización de corto plazo, mientras que el S ligado al C, constituye una fracción importante para la mineralización de largo plazo. La contribución de la mineralización a la nutrición azufrada es baja (1,7-3,1%). Por lo tanto, en esquemas de alta productividad, la fertilización azufrada, ya sea a través de fertilizantes inorgánicos u orgánicos, constituye una herramienta fundamental para satisfacer los requerimientos de S de los cultivos (Girma *et al.* 2005).

1.3.-FUENTES AZUFRADAS

1.3.1. Clasificación y fuentes azufradas utilizadas en la Argentina.

La mayor parte de las fuentes azufradas utilizadas en agricultura contienen el S en forma de SO_4^{2-} (i.e. fuentes sulfatadas). Estas presentan variaciones en su solubilidad en agua. Así, el yeso agrícola se lo considera poco soluble ($2,4 \text{ g L}^{-1}$ a 0°C , Gowariker *et al.* 2008), mientras que las demás sales sulfatadas utilizadas en agricultura presentan mayor solubilidad (e.g. sulfato de amonio 706 g L^{-1} 0°C , Bixby & Beaton, 1970). El yeso o cualquier fuente sulfatada con una solubilidad en agua mayor a ese mineral es considerado como “soluble” (Gowariker *et al.* 2008) y presentan en general similar performance agronómica (Tisdale *et al.* 1993, Til, 2010).

Por el contrario, el S elemental (AE) es una fuente insoluble en agua y debe oxidarse a SO_4^{2-} para ser aprovechado por las plantas (Beaton *et al.* 1985; Mc Caskill & Blair, 1989; PPI, 1997; Schoneau *et al.* 2008; Til, 2010). En la Tabla 1.1 se detallan los principales fertilizantes azufrados de origen químico o mineral utilizados en la agricultura.

Tabla 1.1. Principales fuentes azufradas utilizadas en la agricultura (adaptado de Fertilizer Manual, 1998 e PPI, 1997).

Fertilizante	Fórmula química	% de S	Forma S	Estado
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	24	SO_4^{2-}	Sólido
Tiosulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$	26	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	Líquido
Sal de Epsom	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13	SO_4^{2-}	Sólido
Yeso agrícola	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	12-18	SO_4^{2-}	Sólido
Sulf. de magnesio hidratado	$\text{Mg SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	22	SO_4^{2-}	Sólido
Sulf. de magnesio anhidro	$\text{Mg} \cdot \text{SO}_4$	26	SO_4^{2-}	Sólido
Sulpomag	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2 \cdot \text{MgSO}_4$	22	SO_4^{2-}	Sólido
Sulfato de potasio	K_2SO_4	18	SO_4^{2-}	Sólido
Azufre elemental	S^0	30-100	S^0	Sólido
Superfosfato simple	$\text{Ca} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ $+\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	14	SO_4^{2-}	Sólido
Superfosfato triple	$\text{Ca} (\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ $+\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	<1	SO_4^{2-}	Sólido

En la Región Pampeana, las principales fuentes azufradas sólidas aplicadas en cultivos de granos son el sulfato de amonio (SA), yeso agrícola (YS) y superfosfato simple de calcio (SPS)(Torres Duggan, 2008). EL SA también es una fuente nitrogenada (fertilizante compuesto), mientras que el SPS es una fuente fosfatada y azufrada. Como se menciono antes estos fertilizantes son todos solubles en agua y por ello en la bibliografía frecuentemente se utiliza el término “fuente sulfatada” o “fuente soluble” en forma indistinta.

El YS, al igual que otros minerales utilizados en la agricultura pueden variar marcadamente su pureza y contenido de S. Relevamientos de muestras de YS efectuados en la Argentina revelan importantes variaciones en su pureza mineralógica y contenido de S biodisponible (Ponce & Torres Duggan, 2005; Torres Duggan, 2007). Estas variaciones también se pueden presentar en fertilizantes azufrados de origen mineral como el AE. La tendencia en la provisión moderna de este tipo de agro-minerales se orienta hacia fuentes de AE más concentradas en S. En el ámbito agropecuario, el AE es utilizado principalmente como enmienda para corregir la alcalinidad de los suelos, aunque el uso como fertilizante azufrado también es frecuente, fundamentalmente formando parte de fertilizantes complejos.

El consumo de AE creció significativamente a nivel global, especialmente en regiones como China, África y Latinoamérica (Figura 1.4). En la Argentina el consumo es aún bajo, pero en aumento y se dispone de importantes yacimientos de este mineral en Jujuy, Salta y Catamarca (Peroni y Castro, 2005). Asimismo, el AE obtenido como subproducto de la industria petroquímica, también puede ser desarrollado y adaptado para el uso agrícola y constituye una fuente de provisión muy importante.

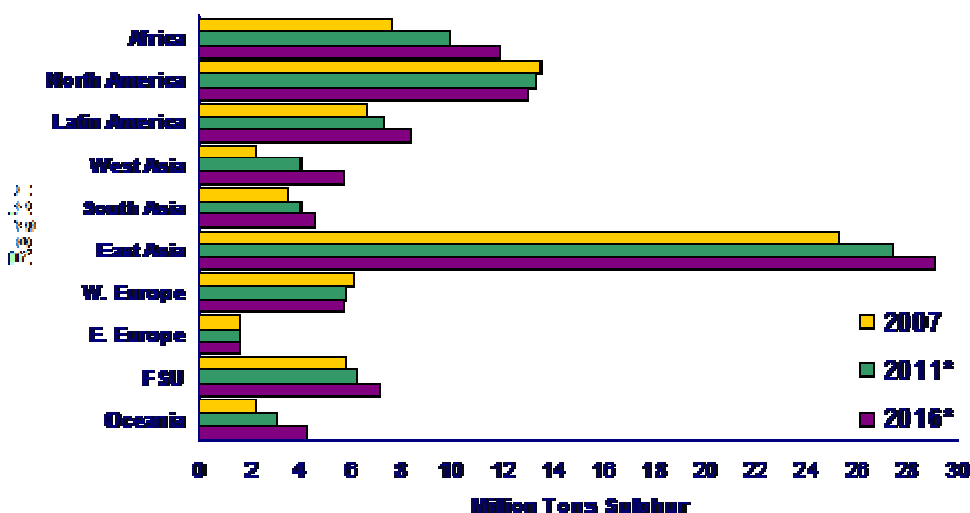


Figura 1.4-Consumo de azufre elemental en diferentes regiones del mundo y proyecciones a 2011 y 2016 (Randazzo, 2008). FSC corresponde a Rusia y Ucrania.

El AE presenta una importante versatilidad agronómica, ya que puede ser aplicado al suelo en forma directa o formulado en mezclas físicas (blends). Como materia prima de mezclas físicas granuladas permite incrementar considerablemente la concentración de S en la formulación y obtener relaciones N:P:S o P:S más balanceadas en relación a las fuentes solubles.

En cuanto a los fertilizantes azufrados líquidos, en la Argentina se utilizan principalmente soluciones de SA (8 % de N y 9 % de S) y tiosulfato de amonio (TSA, 12 % de N y 26 % de S), que en general se mezclan con UAN (i.e. soluciones de urea y nitrato de amonio, 30-32% de N) para conformar formulaciones nitro-azufradas con contenidos variables de N y S. La principal limitante de las soluciones de SA es la baja concentración de nutrientes (i.e., mayor costo de transportes y manipuleo). Por el contrario, el TSA, que es la fuente azufrada líquida más desarrollada en el mundo, presenta mayor concentración de S en solución y actúa como inhibidor de la ureasa cuando se la mezcla con UAN (Uranga, 2007). Las soluciones de SA, contienen todo su S como SO_4^{2-} , inmediatamente disponible para las plantas. El TSA contiene el S como tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) que reacciona en el suelo produciendo S^0 y SO_4^{2-} en partes iguales.

1.3.2.- Propiedades físico-químicas de fuentes azufradas.

La granulometría de los fertilizantes azufrados sólidos “solubles”, frecuentemente se ubica en el rango de 2-4 mm. Este rango granulométrico resulta adecuado para garantizar la disolución en el suelo, la biodisponibilidad del S agregado, además del manipuleo y la aplicación a campo (Torres Duggan, 2007).

Cuando se utilizan fertilizantes insolubles y/o muy poco solubles en agua (e.g. AE, roca fosfórica, óxidos, etc.) la reducción del tamaño de partícula puede determinar beneficios agronómicos debido a que se mejora la velocidad de disolución del fertilizante en el suelo y la utilización por las plantas (Fertilizer Manual, 1998). En este tipo de compuestos, el atributo que mejor describe la capacidad de proveer nutrientes biodisponibles ya no es la solubilidad (que obviamente no varía con la granulometría del compuesto), sino el “área superficial específica” (relación superficie/masa) del

material que es función del tamaño de partícula. Partículas más pequeñas para una misma masa de fertilizante, implica mayor superficie específica. El proceso de micronizado consiste en la reducción del tamaño de partícula de fertilizantes insolubles y/o muy poco solubles en agua, a una granulometría micrométrica. Este proceso no modifica la solubilidad en agua del material, pero si su área superficial específica. La “reactividad” (capacidad de reaccionar en el suelo) se incrementa con el aumento del área superficial expuesta, que es mayor cuanto menor es el tamaño de partícula del fertilizante (Gowariker *et al.* 2009). Por lo tanto, la tasa de oxidación del AE esta regulada por el área superficial del mineral (Germida & Janzen, 1993).

La Figura 1.5 resume esquemáticamente la clasificación de fertilizantes azufrados según solubilidad en agua (para aquellos solubles) y reactividad (para el AE).

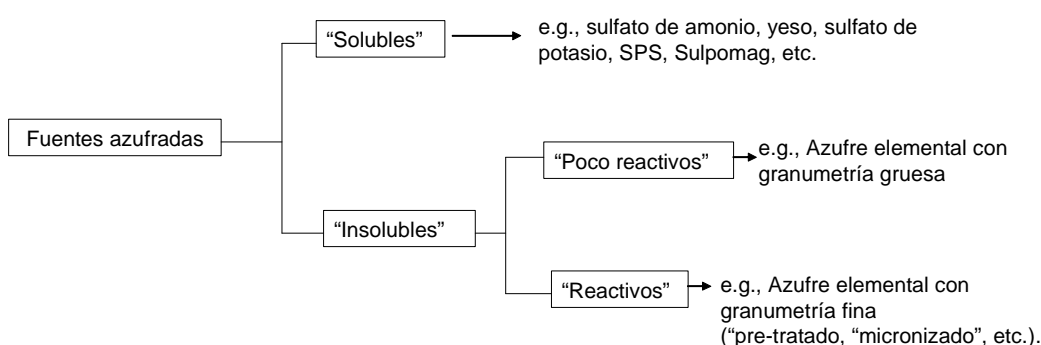


Figura 1.5.- Clasificación de fuentes azufradas según solubilidad en agua y reactividad en el suelo (Elaboración propia en base a Mc Caskill & Blair, 1989; Schoneau *et al.* 2008; Gowariker *et al.* 2009; Til 2010).

Existen diferentes procesos de elaboración del AE que le confieren al mineral propiedades físico-químicas particulares. Así, el AE se presenta en forma granulada (2-4 mm), formando productos complejos o mezclas químicas (e.g. S agregado en forma fundida durante el proceso de granulación de fertilizantes nitrogenados o fosfatados) o recubriendo gránulos de fertilizantes (e.g. ureas recubierta con AE) (Fan & Messick, 2007). En relación al AE procesado en forma de polvo fino, el riesgo de detonación en condiciones de confinamiento limita su almacenamiento y manipuleo en las plantas de fertilizantes.

1.3.3. Oxidación del azufre elemental y factores reguladores

Cuando se aplica AE, la liberación de los SO_4^{2-} esta regulado por el ritmo de la oxidación del mineral en el suelo, por lo cual es importante conocer los factores influyentes y las posibilidades de intervención para incrementar la eficiencia de uso del S aplicado. La oxidación del AE en el suelo se realiza a través de la actividad microbiana (Tabatabai, 2005). La reacción de oxidación es fuertemente ácida debido a la producción de ácido sulfúrico. Esta es la reacción que se aprovecha cuando se utiliza AE en acidificación de suelos. Existen tres grupos de organismos que participan en la oxidación: (1) quimiautotróficos (e.g. bacterias del género *Thiobacillus.*), (2)

fotoautotróficos y (3) heterótrofos (un amplio espectro de bacterias y hongos). Los primeros dos grupos son los responsables de la oxidación de compuestos reducidos de S en suelos bien drenados.

La oxidación del AE es la resultante de la interacción de varios factores relacionados con el ambiente edáfico y manejo (e.g., temperatura, textura, aireación, pH, nutrientes) y también de la fuente de AE utilizada (e.g. composición química, dosis aplicada, forma-tamaño de las partículas y dispersión del mineral en el suelo) (Horowitz & Meurer, 2005, Figura 1.6).

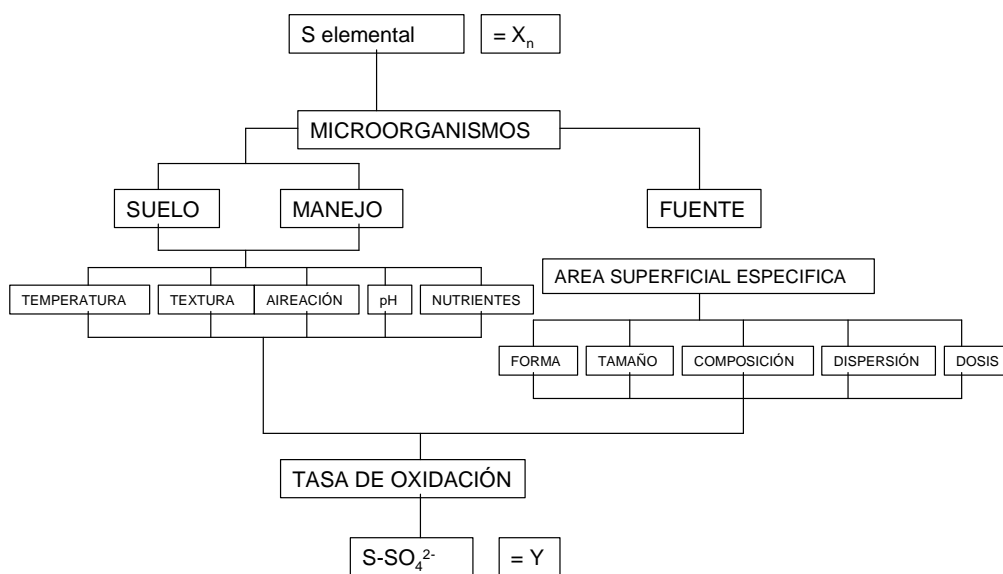


Figura 1.6.- Diagrama de relaciones entre las variables independientes (X_n) y dependientes (Y) que inciden en la oxidación del azufre elemental a sulfato (Horowitz & Meurer, 2005).

Si bien no es posible establecer un tamaño de partícula óptimo del AE utilizado en fertilización de cultivos, la evidencia experimental de los últimos años indica que los tamaños de partícula más apropiados corresponden a granulometrías inferiores a 150-200 μm (Schoneau *et al* 2008; Boswell & Friesen, 1993; Til, 2010). Tamaños de partículas más grandes limitan el acceso microbiano y la velocidad de oxidación, sobre todo cuando se presentan condiciones ambientales poco favorables como bajas temperaturas y/o escasa disponibilidad hídrica. Por tratarse de procesos microbiológicos, la temperatura y humedad regulan directamente el proceso de oxidación. Así, con temperaturas entre 10-40 $^{\circ}C$ la oxidación se incrementa en forma lineal mientras que a temperaturas menores a 4 $^{\circ}C$ se torna muy lenta (Blair *et al.*, 1993). La temperatura óptima para la oxidación varía según el tipo de microorganismo. Sin embargo el rango de 25 a 40 $^{\circ}C$ resulta adecuado para la mayoría de ellos. Suelos muy secos o excesivamente húmedos limitan la oxidación del AE, mientras que el óptimo de oxidación se obtiene con contenidos hídricos cercanos a capacidad de campo (Tisdale *et. al.*, 1993).

En la última década tuvieron lugar importantes avances en el desarrollo de nuevas fuentes de AE más seguras y reactivas en el suelo. Los principales mecanismos a través de los cuales se han logrado mejorar la reactividad de las fuentes de AE son:

- i. Reducción del tamaño de partícula (e.g. micronizado).
- ii. Utilización de aditivos “anti-polvo” (que mejoran la seguridad en el manipuleo).
- iii. Modificación de forma y distribución de las partículas del AE en la matriz de los gránulos (e.g. formas escamosas e irregulares).

La utilización de formas irregulares incrementa la superficie específica y por ello son utilizadas en el desarrollo de nuevas fuentes de azufre elemental (“Sulphur Enhanced Fertilizers”) tanto para aplicación directa como para formulación en mezclas físicas (Beaton *et al.* 1985).

En base a lo mencionado previamente, cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor la tasa de oxidación del AE en el suelo, lo que significa que el AE tardará menos tiempo en oxidarse, y por lo tanto proveerá antes sulfatos disponibles (Bixby & Beaton, 1970; Boswell & Friesen 1993; Schoneau *et al.* 2008). Por ello se dice que estas fuentes son mas “reactivas” que otras de mayor diámetro de partícula.

1.4.-DISPONIBILIDAD DE AZUFRE Y EFECTIVIDAD AGRONÓMICA

1.4.1. Influencia de las propiedades físico-químicas de las fuentes azufradas en la respuesta de los cultivos a la fertilización

El conocimiento de las propiedades físico-químicas de los fertilizantes constituye un aspecto central del manejo de la tecnología de fertilización. Las propiedades químicas, relacionadas con el contenido, forma y disponibilidad de los nutrientes para los cultivos, junto a la efectividad agronómica, inciden en la decisión final de uso de un determinado fertilizante (Fertilizer Manual, 1998).

Las propiedades físicas inciden tanto en el manejo logístico como en la efectividad agronómica, dependiendo del tipo de fertilizante (Fertilizer Manual, 1998). El criterio más común para evaluar la efectividad de los fertilizantes es el rendimiento, mientras que la eficiencia agronómica de los fertilizantes se mide a través de la comparación de efectividad de las diferentes fuentes de nutrientes por unidad de nutriente aplicado (Kilmer, 1968). Siguiendo este criterio, en esta tesis, las diferencias en efectividad o performance agronómica entre fuentes se refieren a diferencias en rendimiento entre fuentes para un determinado tratamiento, mientras que las diferencias en eficiencia agronómica se refiere a diferencias en respuesta (incremento de rendimiento sobre el testigo) por unidad de nutriente aplicado. Cuando se compara la efectividad agronómica de fuentes con diferente reactividad (e.g. AE vs. fuentes solubles, fosfato monocalcico vs. roca fosfórica, etc.) es frecuentemente utilizado la frase “efectividad agronómica relativa” para referirse a la efectividad de una fuente respecto de la otra.

En términos generales, no se observan diferencias en efectividad entre las distintas fuentes sulfatadas solubles utilizadas en la agricultura (Tisdale *et al.*, 1993). Ensayos efectuados por Torres Duggan *et al.* (2006) compararon la efectividad agronómica de dos formas de presentación física de YS (“pelleteada” y “sólido-granulado”), SA y SPS en trigo, en un experimento a campo conducido en un suelo Argiudol típico de Rafaela (Pcia. Santa Fe). Todas las fuentes, que fueron aplicadas con

las mismas dosis (15 y 30 kg ha⁻¹ de S) y forma de aplicación, determinaron respuestas semejantes en el cultivo. Resultados similares fueron reportados por Gutiérrez Boem *et al.* (2007) en la misma región agro-ecológica, utilizando como fuentes YS y SA en cuatro experimentos de campo en soja. Estos autores consideraron que el volumen de agua disponible en el suelo (alrededor de 5 x 10⁵ L para los 20 cm superiores) habría sido suficiente para disolver el YS aplicado, quedando equiparadas las diferencias en la solubilidad del SA y el YS. Además, destacaron que dicho volumen de agua disponible en el suelo podría haber disuelto hasta 1000 kg ha⁻¹ de YS, dosis 10 veces superior a la utilizada frecuentemente.

A diferencia de lo que ocurre con las fuentes azufradas solubles, existe escasa información experimental de campo que compare la efectividad agronómica del AE en relación a las fuentes solubles aplicada a los cultivos de grano. La mayoría de las experiencias se concentran en la evaluación de las respuestas con una o más fuentes sulfatadas solubles o solo en la cuantificación de las respuestas con AE. Lefroy *et al.* (1994) detectaron mayor residualidad del AE en relación a fuentes sulfatadas solubles aplicadas a pasturas que crecieron en invernáculo. En las primeras semanas, el YS resultó más efectivo que el AE, el cual fue mejorando progresivamente su performance, superando al YS en los últimos cortes. Cuando el YS fue más efectivo, la recuperación de S (i.e. % del S absorbido en relación al S aplicado) también fue mayor, evidenciando la inmediata disponibilidad de S-SO₄²⁻. Por el contrario, con el AE la recuperación de S en la biomasa forrajera fue baja en las primeras semanas y se incrementó progresivamente hasta igualar al YS en las últimas semanas.

En términos generales, la liberación progresiva y sostenida de los SO₄²⁻ confiere al AE un carácter más residual en relación a las fuentes solubles y lo ubican como una fuente potencialmente más efectiva en cultivos plurianuales como pasturas y/o frutales. Sin embargo, los resultados pueden variar de acuerdo con las condiciones climáticas o de manejo. Por ejemplo, en ensayos de larga duración el YS determinó rendimientos más elevados y consistentes que el AE, mientras que en pocos sitios el YS presentó menor rendimiento asociado a pérdidas por lixiviación provocadas por lluvias intensas (Girma *et al.*, 2005).

La utilización de fuentes de AE granuladas “reactivas” (e.g., AE micronizado, AE “pre-tratado”, etc.) mejoran la capacidad de liberar SO₄²⁻ dentro del año de aplicación y más aún, podrían resultar efectivas agronómicamente aún en cultivos de invierno. Este tipo de minerales de AE representan una innovación en relación a las fuentes de AE convencionales. La información experimental local en esta temática es aún escasa y no se disponen de experimentos comparativos de efectividad agronómica de fuentes de AE reactivas y fertilizantes sulfatados bajo diferentes condiciones edafo-climáticas.

1.4.2.-Influencia de variables climáticas en la efectividad y eficiencia de las fuentes azufradas

A diferencia de lo que ocurre con las fuentes azufradas solubles, cuando se fertiliza con AE, las condiciones ambientales pueden incidir considerablemente en la efectividad agronómica. Condiciones ambientales limitantes para su oxidación como sequía en el estrato superficial del suelo o bajas temperaturas durante el invierno, pueden limitar la liberación de SO₄²⁻ desde el AE (Mc Caskill & Blair, 1989). La

temperatura media del mes más frío en la Región Pampeana (junio o julio, según latitud) es de alrededor de 12°C (Hall *et al.* 1992). En la Pampa Ondulada y Plana (norte y centro de Buenos Aires, sur de Santa Fe) las temperaturas durante macollaje del trigo son levemente mayores, alrededor de 15°C. Esta temperatura resulta inferior al óptimo térmico del proceso de oxidación del AE (>25°C) pero supera considerablemente la temperatura mínima a la cual dicho proceso es muy lento (<4°C). La limitación térmica no sería tan relevante en cultivos de verano como la soja, cuyo ciclo vegetativo transcurre con temperaturas medias más favorables para la oxidación del AE.

La presencia de suelos profundos en la Pampa Ondulada y Plana y las elevadas precipitaciones durante el otoño, permiten disponer de una adecuada disponibilidad de agua almacenada en el perfil (Hall *et al.* 1992). Esto resulta fundamental para garantizar la demanda hídrica del cultivo de trigo y permitir una adecuada acumulación de biomasa de grano. Sin embargo, durante el macollaje del trigo (invierno) las precipitaciones pueden resultar escasas en relación a las demás estaciones del año, pudiendo limitar la disgregación (disrupción física) del AE en el estrato superficial del suelo y la efectividad del AE. En el caso de los fertilizantes solubles, una lluvia de escasa magnitud luego de la aplicación resulta suficiente para incorporar el fertilizante en el suelo. Por el contrario, el AE requiere de un período de exposición de las partículas más prolongado en el estrato superficial del suelo para lograr la disrupción de las partículas y resultar efectivos agrónomicamente. En soja, los ciclos de siembra en cultivos de primera o de segunda fecha, coinciden en términos generales con el semestre cálido del año, período en el cual se registra entre el 60 y 70% de las precipitaciones anuales (Murphy *et al.* 2008, Figura 1.7). En este cultivo, en años donde las precipitaciones se acercan al promedio histórico, los balances hidrológicos resultan positivos, siendo más importantes los posibles efectos de eventos de estrés en los períodos críticos para la definición del rendimiento (e.g. sequía durante llenado de granos).

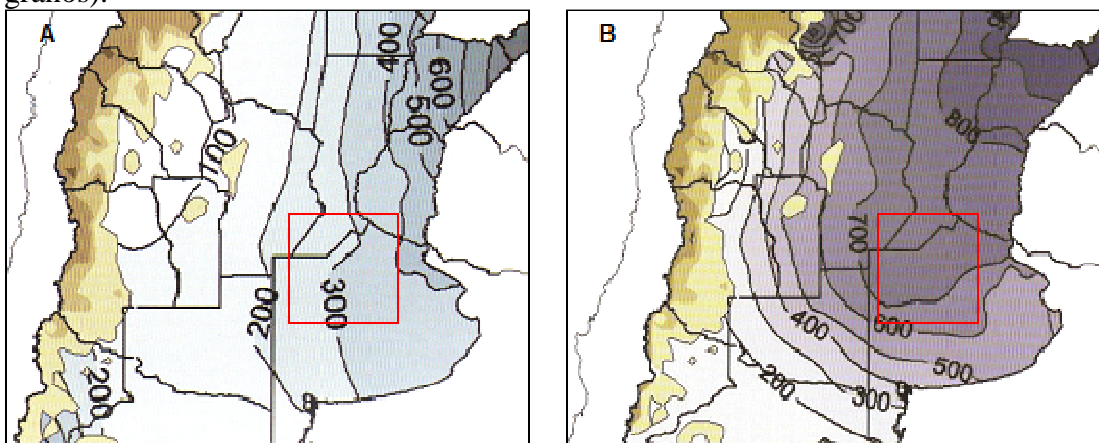


Figura 1.7.- Precipitaciones acumuladas en el semestre frío (A) y cálido (B) en la Región Pampeana argentina. El recuadro rojo corresponde al área de estudio donde se establecieron los experimentos.

La menor temperatura media en macollaje de trigo, si bien podría reducir la efectividad del AE en este cultivo (i.e. menor efecto directo de la fertilización), podría determinar una mayor residualidad para los cultivos subsiguientes, como en la soja de 2da. comparado con las fuentes sulfatadas solubles.

Por lo antedicho, se deduce que la información disponible sobre la efectividad del AE micronizado en relación a fuentes solubles en ambientes edafo-climáticos de Región Pampeana es aún poco concluyente. Considerando que estas fuentes azufradas son progresivamente utilizadas a nivel global y local, para incrementar el conocimiento sobre la efectividad y eficiencia del S aplicado en condiciones de campo, se requiere de estudios que serán desarrollados en esta tesis.

1.5-OBJETIVO GENERAL DE LA TESIS

Estudiar los efectos directos de la fertilización con fuentes azufradas que presentan diferente forma química del S y solubilidad en agua, en el cultivo de trigo y soja de primera. Evaluar la residualidad de la fertilización azufrada del S aplicado en el trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda en diferentes condiciones edafo-climáticas. Asimismo, relacionar las respuestas con variables edafo-climáticas.

1.6.-ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis está organizada en cinco capítulos. En el capítulo 3 se evalúa la fertilización azufrada en trigo y soja de primera, analizando los efectos de fuente, dosis, respuesta a la fertilización (efectividad agronómica) y la eficiencia agronómica del S aplicado (i.e. kg de grano kg de S aplicado⁻¹). También se analiza en ese capítulo la incidencia de variables climáticas y edáficas en las respuestas observadas. En el capítulo 4, se estudian los efectos residuales de la fertilización del trigo en la soja de segunda y la relación entre las mismas y variables edáficas y climáticas. Por último, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones de la tesis.

1.7-BIBLIOGRAFIA.

- Anderson, G.C., Fillery, I.R.P., Ripper, F.H., Leach, B.J. 2006. Sulfur mineralization in coarse-textured soil after different sulfate fertilisation histories, and yield responses of wheat and lupin. *Australian Journal of Soil Research*. 44, 165-174.
- Beaton, J.D.; Fox, R.; Jones, M. 1985. Production, Marketing and Use of Sulfur Products. In: Engelstad O.P. 1985. *Fertilizer Technology and Use*. Editor. Soil Science of Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 631 p.
- Bixby, D.W., Beaton, J.D. 1970. Sulphur-containing fertilizers. Properties and Applications. Technical Bulletin Number 17. The Sulphur Institute. 27 p.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., Dana, M., Anderson, G.C. 1993. Modelling of sulphur oxidation from elemental sulfur. *Plant and Soil*. 155/156: 379-382.
- Boswell C.C. & D.K. Friesen. 1993. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures. *Fertilizer Research*. 35:127-149.
- Ciampitti, I., A., García. F.O. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, Oleaginosas e industriales. *Archivo Agronómico* N°11. En: *Informaciones Agronómicas* N°33. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) Cono Sur. 28 p.

- Darwich, N. A. 2005. Los Nutrientes Secundarios: azufre, calcio y magnesio. Capítulo VII. En: Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Talleres de Gráfica Armedenho. Segunda Edición. 289 p.
- Echeverría, H.E. 2005. Azufre. En: Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos. H. Echeverría y F. García, Editores. Ediciones INTA. 525 p.
- Eriksen, J. 2005. Gross sulphur mineralization-immobilisation turnover in soil amended with plan residues. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 2216-2224.
- Fan, M.X., Messick, D. L. 2007. Correcting Sulphur Deficiency for Higher Productivity and Fertilizer Efficiency. The Sulphur Institute (TSI). Washington. United States. 11 p.
- FAO, 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 p
- Fertilizer Manual. 1998. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC). 615 p.
- Galantini, J., Iglesias, J., Landriscini, Suñer, L., Minoldo, G. 2008. Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. J. Galantini (editor). L. Suñer, M.R. Landriscini, J.O. Iglesias (Compiladores). Editorial de la Universidad Nacional del Sur. 308 p.
- García, F.O., Boxler, M., Minteguiaga, J., Pozzi, R., Firpo, L., Deza Marín, G., Berardo, A. 2006. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. Primera edición.
- Germida, J.J.; Janzen, H.H. 1993. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. *Fertilizer Research*. V. 35: 101-114.
- Girma, K., Mosali, J., Freeman, K.W., Raun, W.R. 2005. Forage and Grain Yield Response to Applied Sulfur in Winter Wheat as Influenced by Source and Rate. 28:1541-1553.
- Gowariker V., V.N. Krishnamurthy, S. Gowariker, M. Dhanorkkar & K. Paranjape. 2009. The Fertilizer Encyclopedia. A John Wiley & Sons, INC. 861 pp
- Gutiérrez Boem, F. H. 2006. Azufre. En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados. R. Alvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 p.
- Gutiérrez Boem; F.H., Prystupa, P., Ferraris, G. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104, 2007.

- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot J. P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: C.J Person (Ed). Ecosystems of the World. Field Crop Ecosystems. Elsevier, Amsterdam. 413-450 pp.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2000. Sulphur in agroecosystems. *Folia Universitatis Agriculturae Stetinensis*. 204 Agricultura (81): 17-32
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2007. Sulfur and Plant Disease. Chapter 8 (101-118 p). In: Mineral Nutrition and Plant Disease. L.E. Datnoff, W.H. Elmer and D.M. Huber (editors). The American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota. USA. 278 p.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2007. Sulfur interactions in crop ecosystems. Chapter 2. In: Sulfur in Plants. An Ecological Perspective. M.J. Hawkesford and L.J. de Kok (editors). Springer 17-58 p
- Horowitz, N., Meurer, E.J., Enofre. 2005. Uso de enxofre elementar como fertilizante. En: Informacoes Agronomicas. N°12. Dezembro. POTAFOS.
- IPNI, 2007. Agriculture and the fertilizer market in Argentina. Regional update, diciembre 2007. Disponible en www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf.
- Kilmer, V.J. Webb, J. 1968. Agronomic Effectiveness of Different Fertilizers. Chapter 2. In: Changing Patterns in Fertilizer Use. Nelson, L.B.; Mcvickar M.H.; Munson, R.D.; Seatz, L.F.; Tisdale, S.L., White, W.C. (Editorial Committee). Dinauer, R. (managing Editor). Soil Science Society of America, INC. Madison, Wisconsin, USA. 466 p.
- Lefroy, R.D.B., Dana, M., Blair, G. 1994. A glasshouse evaluation of sulfur fertilizer sources for crops and pastures. III: Soluble and non-soluble sulfur and phosphorus sources for pastures. *Aust. J. Agric. Res.*, 45, 1525-37
- Mc Caskill, M. R., Blair, G. 1989. A model for the release of sulfur from elemental S and superphosphate. *Fertilizer Research* 19: 77-84.
- Mengel, K., Kirkby, E. A. 2000. Principios de Nutrición Vegetal. 4ª Edición. 1º en español. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza. 607 p.
- Mizuno, I., de Lafaille, B., de López Camelo, L. G. 1990. Caracterización del azufre en algunos Molisoles de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* N°2. 111-117 p.
- Murphy, G. M., Hurtado, R.H., Fernandez Long, M.E., Serio L.A., Faroni, P.A., Maio, S., Spescha, L.B., Barnatán, I.E. 2008. Atlas Agroclimático de la Argentina. Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 130 p.
- Pernoni, J.; Castro, L. 2005. Argentina. En: Otros minerales. Capítulo VII. L. Castro y R. Melgar (coordinadores). Minerales para la agricultura en Latinoamérica. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (Editores). CyTED. UNSAM-OLAMI. 574 p.

- Porta J., M. López Acevedo, C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Editorial Mundi-Prensa. Tercera Edición. 929 p.
- Ponce, B.; Torres Duggan, M. 2005. Yeso. En: Minerales para la agricultura en Latinoamérica. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (Editores). CyTED.UNSAM-OLAMI. 574 p.
- PPI-1997. Manual Internacional de Fertilidad de Suelos. Potash and Phosphate Institute (PPI). Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC). 74 p.
- Randazzo, C., 2008. Sulphur Trends. In: China Phosphate Fertilizer Industry Association. Phosphate Fertilizer Fair and Exhibition. Weifang, Shandong, China. October, 25.
- Rice, R.W. 2007. The Physiological Role of Minerals in the Plant. Chapter 2 (9-30 p). In: Mineral Nutrition and Plant Disease. L.E. Datnoff, W.H. Elmer and D.M. Huber (editors). The American Phytopathological Society. St. Paul, Minnesota. USA. 278 p.
- Rubio, G.; lavado, R.S., Taboada, M.A., Sheiner, J.D., Zubillaga, M.M; Vrdoljak, G. 1996. Ventajas de la fertilización combinada en colza-canola. Oleaginosos. 14: 16-19.
- Schoneau, J.L.; Malhi, S.S. 2008. Sulfur form and cycling processes in soil and sulfur fertility. Chapter 1. In: Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition. Joseph Jez (Editor). Agronomy Monograph N°50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Tabatabai, M.A., 2005. Chemistry of sulfur in soils. In: Chemical Processes in Soils. M.A Tabatabai and D.L Sparks (Co-editors). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Til A.R. 2010. Sulphur sources. Chapter 10. In: Sulphur and Sustainable Agriculture. First edition. IFA, Paris, France. 70 pp.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., Havlin, J.L. 1993. Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. In: Soil Fertility and Fertilizers. Fifth edition. Macmillan Publishing Company. 634 p.
- Torres Duggan M. 2008. Fertilizantes químicos y minerales. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Segunda Edición. Hemisferio Sur-INTA. R. Melgar y M. Díaz Zorita. Coordinadores. 569 p.
- Torres Duggan, M. 2007. Calidad de fertilizantes. ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico?. En: Simposio "Fertilidad 2007". "Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos". Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) y Fertilizar Asociación Civil. García, F y Ciampiti, I. Editores. 160 pp.

- Torres Duggan, M; Gambaudo, S.; Quaino, O. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en trigo en un suelo Argiudol Típico de Santa Fe-Argentina. CD Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo-Salta. Argentina.
- Uranga, M. 2007. Avances tecnológicos en fertilizantes líquidos. 13 pp. En: Simposio de Tecnología de la fertilización. Rodríguez, M., Torres Duggan, M., Gambaudo, S. Editores. CD. ISBN 978-987-21419-8-1.
- Wang, Z. H., Li, S.X., Malhi, S. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. Journal of The Science of Food and Agriculture. 88:7-23.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS GENERALES

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la información general de los ensayos, las características del área de estudio y el diseño experimental utilizado. Las determinaciones efectuadas en suelo, planta, como así también la descripción detallada de los sitios experimentales serán descriptas oportunamente en los capítulos correspondientes (Materiales y métodos específicos).

Los cultivos elegidos para los ensayos fueron trigo (*Triticum aestivum* L) y soja (*Glycine max* (L) Merr.). Esta última especie se cultivó luego del trigo (i.e. soja de segunda) y en ciclos de primavera (i.e. soja de primera). Los tratamientos establecidos fueron dos formas químicas de S y solubilidad en agua: S elemental (insoluble) y $S-SO_4^{2-}$ (soluble). El S se aplicó en dos niveles de dosis (media y alta). El grado equivalente del azufre elemental utilizado es 0-0-0+95% de S. Las características físicas y químicas de esta fuente se detallan en los materiales y métodos específicos, en cada capítulo.

2.2.-DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los ensayos se realizaron en la Región Pampeana (Argentina), dentro de las unidades fisiográficas denominadas “Pampa Ondulada” y “Pampa Plana” (Figura 2.1 y 2.2).

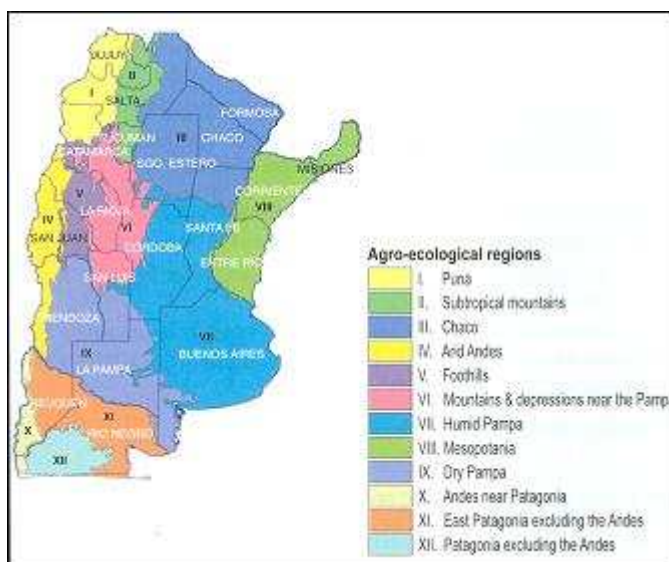


Figura 2.1.- Principales regiones agro-ecológicas de la Argentina. La Región Pampeana corresponde al color celeste (“Humid Pampa”). FAO, 2004.

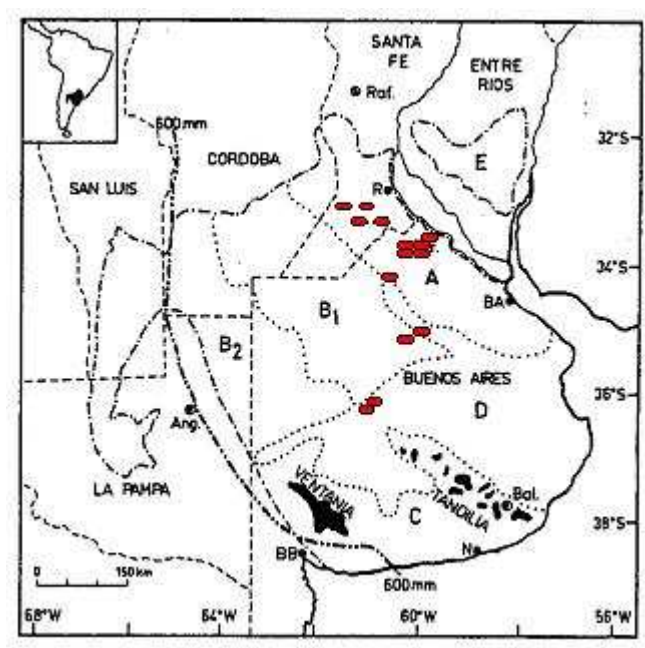


Figura 2.2. Ubicación de los sitios experimentales. Los círculos rojos corresponden a los sitios experimentales. A: Pampa Ondulada. B1: Pampa Plana (Hall *et al.* 1992).

La Región Pampeana constituye la principal zona de producción de agroalimentos de la Argentina (Lavado, 2006). Dentro de ella, la Pampa Ondulada comprende una parte muy importante, con una superficie de alrededor de 5 M ha. Esta región se caracteriza principalmente por su relieve normal con lomas suavemente onduladas y lomas ligeramente extendidas, bien drenadas, siendo las pendientes generalmente medias, con gradientes menores al 2%. Existen áreas que presentan un marcado deterioro estructural causado por significativos descensos de la materia orgánica (Lavado & Taboada, 2009). Este deterioro se evidencia por el incremento de la susceptibilidad del horizonte superficial a formar una estructura masiva, encostramiento superficial y pérdida de porosidad estructural (Cosentino & Pecorari, 2002).

Los suelos predominantes de la Región Pampeana corresponden al orden de los Molisoles. En la Pampa Ondulada predominan los subórdenes Argiudoles típicos y vérticos. En la Pampa Plana y también en el oeste de Buenos Aires, se ubican suelos con menor desarrollo morfológico (Hapludoles y Haplustoles, típicos y énticos).

Los principales cultivos de la Región Pampeana son trigo, maíz, soja y girasol (FAO, 2004). Las rotaciones o secuencias de cultivos son variables, pero se destacan dos secuencias principales:

- 1-Tres cultivos en dos años: Maíz-Trigo/soja 2da.
- 2-Cuatro cultivos en tres años: Maíz-Trigo/Soja 2da-Soja 1ra.

En la última década del siglo XX se produjo en la Región Pampeana una notable intensificación de la actividad agrícola con incrementos significativos en la producción de granos. La adopción de nuevos materiales genéticos, la fertilización, la utilización de agroquímicos, sumado a la progresiva incorporación de tecnologías de procesos como la siembra directa, fueron los principales impulsores de dicha intensificación. Algunos de los cambios verificados en los años '90 fueron el incremento del área con doble cultivo

(especialmente trigo/soja), sustitución parcial de ganadería por agricultura y alguna expansión de los cultivos anuales fuera de la Región Pampeana (Reca & Parellada, 2001). También, más recientemente, se incrementó la proporción de monocultivo de soja, sobre todo en campos alquilados, representando entre el 50 y 70% del área sembrada, según la localidad considerada.

Actualmente, a pesar del importante aumento del consumo de fertilizantes, persisten balances de nutrientes negativos en gran parte de la Región Pampeana (Cruzate & Casas 2003; García 2003; García 2004) y existen situaciones de degradación de la estructura y de la fertilidad de suelos en forma generalizada en toda la región, ya sea en áreas planas o inclinadas (Michelena *et al.* 1988; SAGyP-CFA, 1995).

El principal sistema de labranza utilizado en la Región Pampeana es la siembra directa y en menor proporción se utilizan sistemas de mínima remoción del suelo (e.g. labranza vertical) o convencional (e.g. arados o rastras de disco). Los principales factores que determinaron la expansión de la siembra directa fueron el aumento en el costo del combustible, la disponibilidad de herbicidas como el glifosato a precios accesibles y el uso de variedades de soja genéticamente resistentes a estos herbicidas (FAO, 2004). A pesar de estas ventajas económicas y operativas, que sin duda fueron impulsores destacados de este sistema de labranza, la SD también presentó implicancias fundamentales en cuanto a conservación de suelos y aguas, debido al mayor control de la erosión hídrica y eólica. La utilización de la siembra directa creció marcadamente alcanzando el 70% del área sembrada en la actualidad (Alvarado, 2009).

El clima de la Región Pampeana es templado húmedo sin estación seca y con verano cálido. Los límites climáticos abarcan desde la isoterma media anual de 17°C en el norte y las isotermas de 14 y 15°C en el sur de la región. La precipitación anual varía desde 600 mm en el sur y oeste hasta 1000 mm en el noreste.

Los períodos húmedos del año corresponden al otoño y primavera-verano (Murphy *et al.* 2008). Por el contrario, el invierno, constituye la estación con menor proporción de precipitaciones. En la Figura 2.3 se muestra las precipitaciones medias del semestre cálido y frío del año para la Región Pampeana.

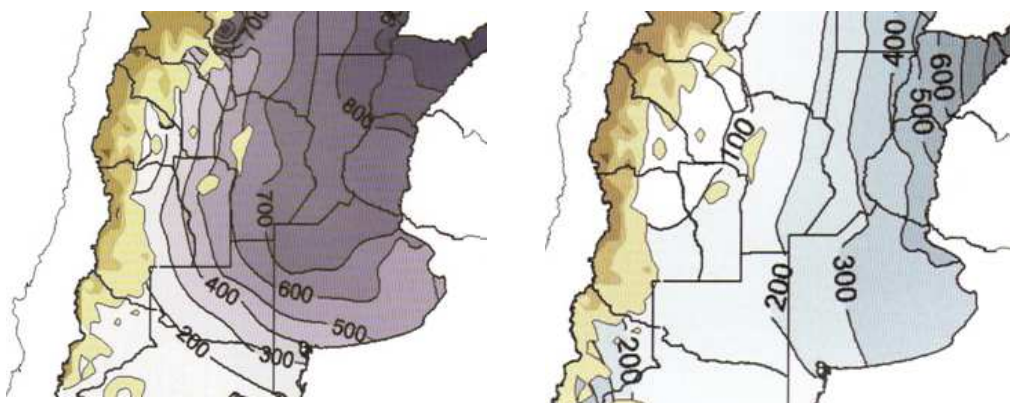


Figura 2.3. Precipitaciones medias mensuales del semestre cálido (izquierda) y semestre frío (derecha) en la Región Pampeana (Murphy *et al.* 2008)

2.3.-CARACTERIZACIÓN Y UBICACIÓN DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES

Se realizaron ensayos de campo durante dos años consecutivos en parcelas ubicadas en lotes de producción de la Pampa Ondulada y Plana (provincias de Buenos Aires y Santa Fe)(Figura 2.2). Se cultivó soja de primera (cuatro sitios en el primer año y cinco sitios en el segundo año) y doble cultivo trigo/soja de segunda (cinco sitios en primer año y tres sitios en segundo año). Los suelos se caracterizaron fisiográficamente y taxonómicamente a partir de información provista por el INTA (Salazar Lea Plaza *et al.*1989; Mosconi *et al.* 1981 y Espino *et al.*1983) y el archivo cartográfico de Tecnoagro S.R.L (inédito).

En las Tablas 2.1 y 2.2 se resumen las principales características fisiográficas, edáficas y ubicación geográfica de los sitios experimentales. En los capítulos 3 y 4 se presentan las características de fertilidad de los sitios, además de la metodología específica (e.g. determinaciones en suelo y planta, información de manejo y climática, etc.).

Los suelos y cultivos fueron conducidos con las prácticas habituales en cada una de las zonas donde se establecieron los experimentos.

Tabla 2.1. Características edáficas y fisiográficas de los sitios experimentales.

Sitio	Provincia	Tipo de suelo	Fisiografía*
Pergamino, Urquiza	Buenos Aires	Argiudol típico	Pendientes marcadas, de hasta 3%, transicionales entre los sectores altos y los cursos fluviales mas importantes
San Pedro	Buenos Aires	Argiudol vértico	Planicies extendidas planas a muy nuevamente onduladas, flanqueadas por pendientes y bajos pertenecientes a vías de escurrimiento que drenan al Río Paraná.
Junín	Buenos Aires	Hapludol éntico	Lomas suavemente onduladas, con áreas deprimidas.
Alberti	Buenos Aires	Hapludol típico	Planicies amplias y onduladas (dominio de Argiudoles) y lomas que limitan con el sector arenoso (dominio de Hapludoles).
Bolívar	Buenos Aires	Hapludol típico	Llanuras arenosas suavemente onduladas, cordones arenosos alargados de extensión variable con forma de media luna y planicies.
Bragado	Buenos Aires	Hapludol tapto árgico	Llanuras arenosas suavemente onduladas. Cordones arenosos alargados con forma de media luna y planicies.
Santa Arequito, Fuentes.	Teresa, Firmat, Santa Fe	Argiudol vértico	Planos altos suavemente ondulados y planos altos extendidos de relieve normal a subnormal, áreas bien drenadas con pendientes de hasta 2%, con cursos fluviales importantes.

* En base a Salazar Lea Plaza *et al.*, (1989), Mosconi *et al.*, (1981) y Espino *et al.*, (1983).

Tabla 2.2. Latitud y longitud de los sitios experimentales.

Localidad	Latitud y longitud
Pergamino	33° 53' S, 60 ° 28' W
Urquiza	33° 55' S, 60 ° 22' W
San Pedro	33° 41' S, 59 ° 41' W
Junín	34° 33' S, 60 ° 55' W
Alberti	35° 01' S, 60 ° 16' W
Bolívar	36° 13' S, 61 ° 07' W
Bragado	35° 07' S, 60 ° 30' W
Santa Teresa	32° 25' S, 60 ° 52' W
Arequito	33° 09' S, 61 ° 29' W
Firmat	33° 26' S, 61 ° 29' W
Fuentes	33° 11' S, 61 ° 04' W

2.4.- TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En todos los ensayos se evaluaron dos fuentes azufradas de diferente solubilidad y forma química (sulfato de amonio, 21-0-0+24 S, soluble en agua) y azufre elemental (AE, 0-0-0+95% S, insoluble en agua). Las fuentes azufradas se evaluaron en dos niveles de dosis: media y alta. En los capítulos 3 y 4 (Materiales y Métodos específicos) se detallan las dosis aplicadas en cada año. El tamaño de las unidades experimentales fue de 7 x 10 m. Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizado (DBCA) con cuatro o seis repeticiones (según el año) con arreglo factorial (2 x 2). Los factores y niveles de factores evaluados fueron:

Factor 1: tipo de fuente (S-SO₄²⁻ o S°).

Factor 2: dosis de aplicación (baja y alta)

En todos los casos se utilizó un tratamiento testigo (sin agregado de S). Las dosis de fertilizantes y su forma de aplicación se detallan en los capítulos 3 y 4 (Materiales y Métodos específicos).

El modelo estadístico utilizado para evaluar los efectos de fuente y dosis corresponde a un experimento factorial con dos factores y diseño en Bloques Completo Aleatorios (DBCA). Cada observación se describe como:

$$Y_{ijk} = \mu + p_k + T_i + \beta_j + (T\beta)_{ij} + e_{ijk}$$

Donde:

μ representa la media general,

p_k representa el efecto del k-ésimo bloque,

T_i representa el efecto principal para el factor A, a nivel i,

β_j representa el efecto principal del factor B a nivel j,

$(T\beta)_{ij}$ representa la interacción cuando el factor A está a nivel i y el factor B esta a nivel j,

e_{ijk} representa el error aleatorio en la repetición k del tratamiento que combina el nivel i del factor A y el nivel j del factor B

2.5. MUESTREOS Y DETERMINACIONES EN SUELO Y PLANTA

Suelo

Previo al inicio de los experimentos, se realizó un muestreo compuesto de suelos en el estrato 0-20 cm a fin de caracterizar variables de fertilidad en cada sitio experimental (15-20 submuestras por muestra compuesta). El detalle analítico se presenta en “Metodología específica” de cada capítulo.

Planta

Se determinó biomasa de grano para los diferentes cultivos en madurez fisiológica con cosechadora mecánica experimental estacionaria provista por la EEA INTA Pergamino.

2.6. REGISTRO DE DATOS CLIMÁTICOS

Para evaluar las variables climáticas históricas de los sitios experimentales y regionales, se utilizó el Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy *et al*, 2008).

La información de temperatura y precipitaciones en los diferentes sitios experimentales se recopiló a partir de datos provistos por estaciones experimentales y agencias de extensión de INTA.

2.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los efectos de la fertilización se evaluaron a través del Análisis de la Variancia (ANVA) utilizando todos los tratamientos (testigos y fertilizados).

Para determinar los efectos de fuente, se utilizaron solo los tratamientos fertilizados, a través de un ANVA factorial. Este procedimiento permitió disponer de los efectos de fuente, dosis, interacción fuente x dosis y efecto año. Para cuantificar las diferencias en rendimiento de las fuentes azufradas se utilizaron comparaciones de medias de tratamiento. En los sitios donde la interacción fuente x dosis fue significativa ($p < 0,05$) los contrastes se realizaron para cada nivel de dosis. El ANVA general fue realizado con el programa Statistix (versión 7.0) y para el ANVA factorial se utilizó el programa Info Stat (Profesional, versión 1.1). Los análisis estadísticos en gráficos se realizaron con el software Prism[®] (Graph Pad versión 4.0). Se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo lineal (normalidad de las variables, independencia de las observaciones y homocedasticidad de las variancias).

La asociación entre las respuestas y las variables edafo-climáticas se analizó con los coeficientes de correlación de Pearson y regresión lineal simple.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, O. 2009. La difusión de la tecnología y su impacto sobre los modelos productivos. El aporte del Movimiento CREA. El futuro de la agricultura

- argentina. En: La Argentina 2050. La Revolución Tecnológica del Agro. CASAFA. Ricci, D. (Editora). 744 p.
- Cosentino D.J., Pecorari C., 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 20 (1). 9-16 p
- Cruzate G.A.; Casas R. 2003. Necesidades de aplicación de nutrientes en la Agricultura Argentina. Jornadas Internacionales. Uso de Minerales para la Agricultura Sustentable. Fertilizantes-Correctores de suelos. Pergamino, Buenos Aires, 11 y 12 de septiembre. Actas en CD.
- Espino, L.M, Seveso, M.A., Sabatier, M.A. 1983. Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe. MAG. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Santa Fe. INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EERA Rafaela.
- FAO, 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 p
- García F., 2004. Fertilizers to sustain the production of 100 million tonnes of grain in Argentina. Presented at 6^oConference "Fertilizantes Cono Sur"- British Sulphur Pub. Punta del Este, Uruguay, 21-23 noviembre.
- García F., 2003. Balance de nutrientes en la rotación: Impacto en rendimiento y calidad de suelo. V Conferencia Fertilizantes Cono Sur. British Sulphur. Punta del Este. Uruguay. 7-9 diciembre.
- Graph Pad. Prism. 2003. Versión 4.
- Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot J. P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. In: C.J Person (Ed). *Ecosystems of the World. Field Crop Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam. 413-450 pp.
- InfoStat/Profesional. Universidad Nacional de Córdoba. Estadística y Diseño. FCA. 2002. Versión 1.1.
- Lavado, R. 2006. La Región Pampeana: historia, características y uso de los suelos. En: *Materia Orgánica. Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos*. Roberto Álvarez (Coordinador). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 205 p.
- Lavado, R.S., M. A. Taboada. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *Journal of Soil and Water Conservation* 2009 64(5):150A-153A; doi:10.2489/jswc.64.5.150A

- Michelena R. O, Iurtia C. B, Pittaluga A., Vavruska F., de Sardi M.E., 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*. 6: 60-66.
- Mosconi, F. P., Priano, L.J.J., Hein, N.E., Moscatelli, G., Salazar, J.C., Gutiérrez, T., Caceres, L. 1981. Mapa de Suelos de la Provincia de Santa Fe. Tomo I. INTA. EERA Rafaela, CIRN Cautelar. MAG. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Santa Fe. 245 p.
- Murphy, G. M., Hurtado, R.H., Fernandez Long, M.E., Serio L.A., Faroni, P.A., Maio, S., Spescha, L.B., Barnatán, I.E. 2008. Atlas Agroclimático de la Argentina. Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 130 p
- Reca L.G., Parellada G.H., 2001. El sector Agropecuario Argentino. Aspectos de su evolución, razones de su crecimiento reciente y posibilidades futuras. Editorial Facultad de Agronomía. 149 p.
- SAGyP – CFA. 1995. La Degradación de las Tierras en la República Argentina. Alerta Amarillo. SAGyP, Buenos Aires.
- Salazar Lea Plaza, J.C., Moscatelli, G., Godagnone, R., Ferrao, R., Cuenca, M., Grinberg, H., Sánchez, J., Nakama, V., Sobral, R., Musto, C., Gómez, A., Aleksa, A. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca. Proyecto PNUD ARG 85/019. CIRN-Instituto de Evaluación de Tierras. 525 p.
- Statistix 7. Copyright 1985. Analytical Software. Versión 7.0

CAPÍTULO 3

EFFECTOS DIRECTOS DE LA FERTILIZACIÓN EN TRIGO Y SOJA DE PRIMERA.

3.1.-INTRODUCCIÓN

La fertilización azufrada en la Argentina comenzó a difundirse en los últimos años tras haberse verificado deficiencias de S y respuestas al agregado de fertilizantes en diversos cultivos (Martínez & Cordone, 1998; Cordone & Martínez, 2001; Torres Duggan & Rodríguez, 2009).

La reposición actual del S extraído por los principales cultivos de granos alcanzó el 42% en la campaña 2007/08 y se estima que el 40-50% del área sembrada de trigo, soja y maíz se fertiliza con S, con dosis promedio de 7 a 10 kg ha⁻¹ de S (García & Salvagiotti, 2009).

Si bien para las condiciones de la Región Pampeana no se dispone actualmente de modelos de diagnóstico de fertilidad capaces de predecir las respuestas en base a una sola variable de suelo (e.g. contenido de S-SO₄²⁻) es posible mencionar algunos factores edáficos y de manejo donde es factible observar mayores probabilidades de respuesta a la fertilización azufrada. Entre ellos podemos mencionar una prolongada historia agrícola de los lotes, bajos contenidos de MO y manejo bajo siembra directa (Echeverría, 2005; Gutiérrez Boem, 2006). Estas condiciones determinan “ambientes deficientes”, donde las probabilidades de observar respuestas considerables a la fertilización azufrada son altas.

En Argentina, la mayor parte de las experiencias de fertilización azufrada corresponden a formas sulfatadas solubles (e.g. yeso, sulfato de amonio, etc.) (Melgar & Torres Duggan, 2005; García & Darwich, 2009). Sobre estas fuentes se dispone de información local sobre respuestas a la fertilización en diferentes cultivos (Gutiérrez Boem *et al.* 2007; Torres Duggan *et al.* 2006; Pagani *et al.* 2009). Por el contrario, la información experimental sobre efectividad agronómica del AE es más escasa. El hecho que el AE deba oxidarse en el suelo antes de proveer SO₄²⁻ determina que este fertilizante sea considerado de liberación lenta y capaz de generar mayor residualidad comparado con fertilizantes sulfatados (Fan & Messik, 2007; Schoneau *et al.* 2008; Til 2010). Sin embargo, esto puede variar considerablemente según la granulometría (i.e. reactividad) de la fuente azufrada (Boswell & Friesen, 1993). Así, el micronizado del AE incrementa el área superficial específica del mineral, la velocidad de oxidación y por lo tanto puede determinar un patrón de liberación de SO₄²⁻ más parecido a los fertilizantes sulfatados. Existen evidencias de que cuando se aplican este tipo de fuentes de AE, se pueden observar respuestas a la fertilización dentro del año de aplicado el fertilizante (Mc Caskill & Blair, 1989, Prochnow & Blair, 2010; Til 2010). Estas fuentes se las denomina “Sulphur Enhanced Fertilizers” y pueden resultar en fuentes azufradas interesantes en fertilización de cultivos anuales.

A diferencia de lo que ocurre con fertilizantes solubles, cuando se aplica AE, las condiciones ambientales pueden incidir considerablemente en las respuestas. Condiciones ambientales adversas para la oxidación como una sequía o bajas

temperaturas durante el invierno, pueden limitar la liberación de SO_4^{2-} desde el AE (Mc Caskill & Blair, 1989; Schoneau *et al* 2008).

La disponibilidad hídrica y las condiciones térmicas durante el ciclo del trigo y la soja de primera pueden influenciar la efectividad agronómica del AE comparado con fuentes azufradas solubles. En trigo, las bajas precipitaciones en macollaje podrían limitar la efectividad y eficiencia del AE. En cambio, cuando se aplican fertilizantes solubles, una lluvia de escasa magnitud luego de la aplicación resulta suficiente para incorporar el fertilizante. La menor temperatura media en macollaje de trigo, si bien podría reducir la efectividad del AE en este cultivo (i.e. menor efecto directo de la fertilización), podría determinar una mayor residualidad para los cultivos subsiguientes, como en la soja de 2da. Este aspecto será tratado en el Capítulo 4. En soja, los ciclos de siembra en cultivos de primera o de segunda fecha, coinciden en términos generales con el semestre cálido del año, período en el cual se registra entre el 60 y 70% de las precipitaciones anuales (Murphy *et al.* 2008). Por lo tanto, parecería existir en este cultivo menores limitaciones a la oxidación del AE, por lo menos en cuanto a las condiciones termo-hídricas.

Estudios que permitan establecer el comportamiento del AE en cuanto a su efectividad agronómica en relación a fuentes azufradas solubles no han sido aún desarrolladas para diferentes ambientes edafo-climáticos de la Región Pampeana. Considerando que estas fuentes azufradas son progresivamente utilizadas a nivel internacional y local, se requieren de estudios que aborden estos temas.

3.2.-INTERROGANTES

Este capítulo se desarrollará en base a los siguientes interrogantes:

¿Son esperables diferencias en efectos directos de la fertilización azufrada de trigo y soja de primera relacionadas con la forma química y solubilidad de las fuentes azufradas?.

¿Cómo influyen las condiciones climáticas (e.g., temperatura y precipitación) en la efectividad agronómica del azufre elemental y una fuente sulfatada soluble?

3.3.-OBJETIVO

Comparar la respuesta de trigo y soja de primera a la fertilización con dos fuentes azufradas de diferente forma química y solubilidad en agua.

3.4.- HIPÓTESIS

La necesidad de oxidación del AE reduce la respuesta y eficiencia de uso de S (EUS) comparado con el sulfato de amonio en trigo. Por el contrario, ese efecto es de menor magnitud en soja de primera, debido a las condiciones termo-hídricas más favorables.

3.5.-MATERIALES Y MÉTODOS ESPECÍFICOS

3.5.1.-Características de sitios experimentales

Se realizaron ensayos de campo en lotes de producción de trigo (n= 5, año 1, n=3; año 2) y soja de primera (n=4, año 1; n=5, año 2) a lo largo de dos años consecutivos. Los experimentos se ubicaron en lotes de producción de establecimientos agropecuarios situados en la Pampa Ondulada y Plana. Las características productivas, fisiográficas, edáficas y climáticas del área de estudio fueron descriptas en el Capítulo 2. En la Tabla 3.1 se presentan las características analíticas de los suelos obtenidas al inicio de los experimentos y en la Tabla 3.2 se resume la información de manejo correspondiente a cada sitio experimental.

Tabla 3.1. Principales variables de fertilidad de sitios experimentales (0-20 cm).

Año	Sitio	pH	CIC ...cmol kg ⁻¹	MOg kg ⁻¹	S-SO ₄ ²⁻mg kg ⁻¹	P Bray 1	K	Mg
Ensayos de trigo/soja 2da								
1999/2000	Urquiza	6	11,7	27	6,8	11	333	167
	Arequito	5,8	15,1	29	7,2	18	562	266
	Bolivar	6	8,6	27	4,5	35	513	155
	Alberti	5,9	13,2	29	7,2	12	591	272
	Pergamino (1)	6,4	17,1	41	3,7	21	1607	614
2000/2001	Alberti	6	12,8	37	3,4	11	829	244
	Arequito	6	17,2	41	10,7	55	1204	310
	Bragado	5,9	17,9	37	2,4	22	706	248
Ensayos soja de primera								
1998/99	S. Teresa	6	17,2	34	6,5	15	416	230
	Arequito 1	6,8	12,7	25	7,8	10	560	241
	Pergamino (2)	6,2	11,7	31	12	4	383	215
	S. Pedro	5,7	15,2	45	11,3	6	606	201
1999/2000	Firmat	6	14	19	6,3	5	506	240
	Pergamino (3)	5,8	15,3	19	10,6	5	354	218
	Fuentes	5,8	15,2	17	6,3	6	326	230
	Junin	7,8	10	10	5,5	5	570	254
	Arequito	6	12,7	16	6,8	6	516	285

(1) Urdampilleta; (2) Fontezuela; (3) Villa Dafonte

Tabla 3.2. Información agronómica general de los sitios experimentales.

Año	Sitio	Cultivo antecesor	Variedad	Fecha de siembra
Ensayos Trigo/soja de 2da.				
1999/00	Urquiza	Soja 1ra	Klein Casique	29/6
	Arequito	Soja 1ra	Klein Casique	18/6
	Bolivar	Girasol	Klein Brujo	17/6
	Alberti	Soja 2da	Klein D. Enrique	5/7
	Pergamino (1)	Girasol	Triguero 230	21/7
2000/01	Alberti	Soja 1ra	Klein D. Enrique	21/7
	Arequito	Soja 1ra	Klein D. Enrique	10/7
	Bragado	Soja 1ra	Klein D. Enrique	15/7
Ensayos soja de primera				
1998/99	S. Teresa	Maíz	Don Mario 48	10/11
	Arequito	Soja	Asgrow 6445	9/11
	Pergamino (2)	Maíz	Asgrow 4422	6/11
	San Pedro	Maíz	Asgrow 5634	26/11
1999/00	Firmat	Soja	Pioneer 9492	5/11
	Pergamino (3)	Maíz	Asgrow 4100	7/11
	Fuentes	Soja	Asgrow 4456	4/11
	Junin	Maíz	Asgrow 4501	8/11
	Arequito	Soja	Dorado 4.8	6/11

(1) Urdampilleta; (2) Fontezuela; (3) V. Dafonte

En el Capítulo 2 (Materiales y métodos generales) se describieron las características agro-ecológicas del área de estudio y localización geográfica de cada experimento.

3.5.2.- Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques completos al azar (DBCA) con cuatro repeticiones en el primer año y seis repeticiones en el segundo año. Se aplicó un arreglo factorial de tratamientos. El factor 1 correspondió al tipo de fuente y el factor 2 a la dosis de S aplicada. El factor 1 tuvo dos niveles: azufre elemental (AE, 0-0-0+95% de S) y sulfato de amonio (SA, 21-0-0+24% de S). El AE provisto por Sulferworks® es el producto resultante del proceso de micronizado (partículas de 200 µm) y posterior granulado o aglomeración. El gránulo que se obtiene por este proceso posee un diámetro de 2-4 mm, rango considerado adecuado para el manipuleo y aplicación a campo. Como fuente azufrada soluble se aplicó SA granulado convencional (21-0-0+24 S). En la Tabla 3.3 se presenta la solubilidad en agua de los fertilizantes utilizados.

Tabla 3.3 Solubilidad en agua (a 0°C) de las fuentes azufradas utilizadas en los experimentos (Bixby & Beaton, 1970, Mc Caskill & Blair, 1989; Schoneau *et al.* 2008; Til, 2010).

Fertilizante	Solubilidad en agua
Azufre elemental	Insoluble
Sulfato de amonio	706 g L ⁻¹

El factor 2 tuvo dos niveles (Dosis 1 y Dosis 2): 10 y 30 kg ha⁻¹ de S (primer año) y 15 y 30 kg ha⁻¹ de S (segundo año).

Los fertilizantes se aplicaron al voleo y se incorporaron en forma superficial con mínima labranza. En todas las parcelas se aplicó una fertilización de base con 100 kg ha⁻¹ de N y 10 kg ha⁻¹ de P para evitar limitaciones debidas a estos nutrientes. El N aportado en los tratamientos con SA fue descontado de la fertilización de base en las unidades experimentales correspondientes.

3.5.3-Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se evaluaron por Análisis de la Variancia (ANVA) factorial. Para las comparaciones de medias de tratamiento se utilizó LSD Fisher y los efectos de fuente y dosis se calcularon a través de contrastes ortogonales (sin considerar tratamientos testigo). En los sitios donde la interacción fuente x dosis fue significativa ($p < 0,05$) los contrastes se realizaron para cada nivel de dosis. La asociación entre las respuestas y las variables edafo-climáticas se analizó por medio de los coeficientes de correlación de Pearson y regresión lineal simple.

3.5.4.- Muestreos y determinaciones en suelo y planta

Los resultados de los análisis de suelos efectuados en pre-siembra del cultivo se presentan en la Tabla 3.1. Para la determinación de CIC y cationes intercambiables se utilizó acetato de amonio neutro 1 N y la cuantificación se realizó por espectroscopia de absorción atómica (Thomas, 1982). El nivel de P fue determinado por el método de extracción de Bray & Kurtz N°1 (1945) utilizando una relación suelo-solución de 1:7 con un minuto de agitación y cuantificación colorimétrica por el procedimiento de Murphy & Riley (1962). El C orgánico total se determinó según la metodología propuesta por Nelson & Sommers (1996). El pH se evaluó en forma potenciométrica en una suspensión suelo-agua 1:2,5 (Peech, 1965). Para la extracción de S-SO₄²⁻ se utilizó KH₂PO₄ 1M, con relación suelo-solución de 1:5 luego de una hora de agitación. El S se determinó por turbidimetría utilizando carbón activado y cuantificación espectrofotométrica a una longitud de onda de 450 nm (Lisle *et al.* 1994).

En madurez fisiológica se tomaron muestras de planta para determinar la biomasa de grano. La cosecha, que abarcó una superficie de 2 m² por parcela fue efectuada manualmente. Las plantas fueron secadas en estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante y posteriormente fueron trilladas con máquina experimental estacionaria. La biomasa de grano se expresó en Mg ha⁻¹ en humedad comercial (140 g kg⁻¹).

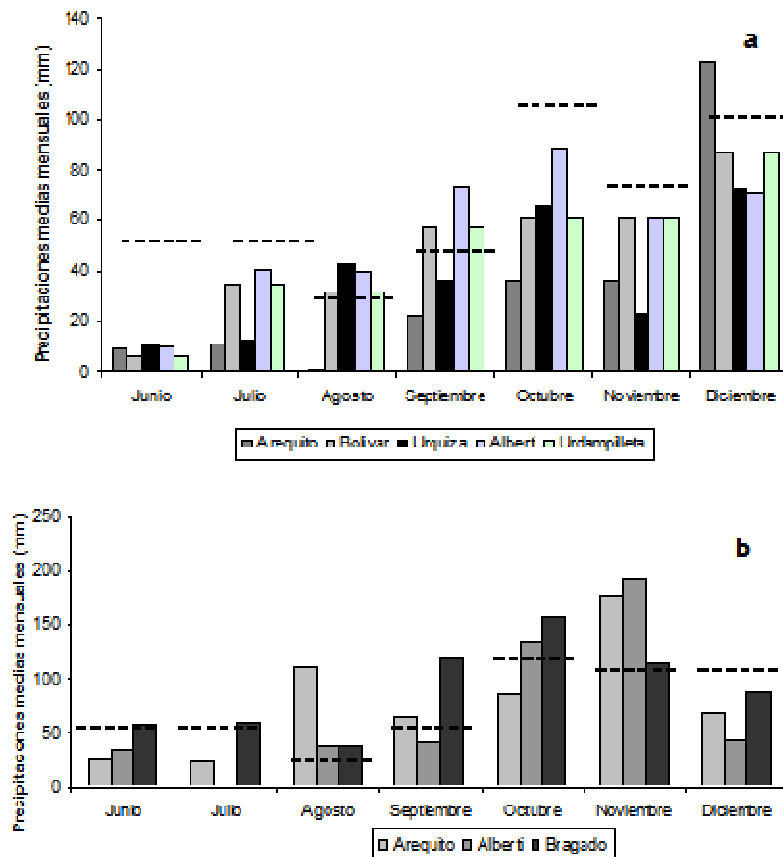
Para definir los meses donde el trigo se encuentra en macollaje se utilizó el software “CRONOTRIGO” (Abeledo *et al.* 2005) solo como referencia orientativa, ya que los genotipos utilizados en esta tesis difiere de los disponibles en este software.

3.6.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.6.1. Experimentos de trigo

3.6.1.1. Características climáticas de los años evaluados

La precipitación media del primer año de experimentos fue 50 % inferior a la del segundo año (730 mm vs 1377 mm) (Figuras 3.1 a y 3.1 b)



Figuras 3.1. Precipitación media mensual. a:año 1 (n=5). b:año 2 (n=3). La línea punteada indica la precipitación media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

En el primer año, la mayoría de los sitios presentaron una pluviometría anual inferior a la media regional: -59, -21, -29, -21% en Arequito, Bolívar, Urquiza y Pergamino, respectivamente. Una excepción fue Alberti, donde la media de precipitaciones fue de 995 mm, similar a la media del área de estudio. En el segundo año de ensayos, las precipitaciones superaron la media regional en todos los sitios: +48, +27 y +45% en Arequito, Alberti y Bragado, respectivamente.

La temperatura media mensual de los dos años de experimentos fue similar a los registros climáticos históricos en el área de estudio (Murphy *et al.* 2008)(Figura 3.2 a y b).

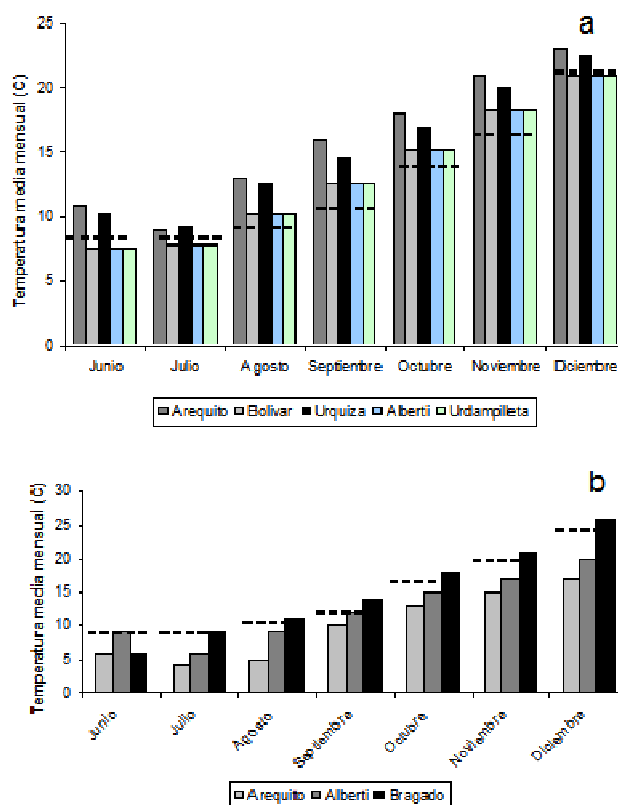


Figura 3.2. Temperatura media mensual para los dos años de experimentos. a:año 1 (n=5). b:año 2 (n=3). Las líneas punteadas indican la temperatura media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

El rango de temperatura media durante el período de macollaje del cultivo (período junio-septiembre) fue de 8 a 14°C para el primer año y de 6 a 12°C para el segundo año, similar a la serie climática histórica (período 1971-2000), en la cual el rango térmico fue de 9 a 13°C. La temperatura media correspondiente al período de macollaje se mantuvo por encima del valor crítico de 4°C, debajo del cual la velocidad de oxidación del AE es muy lenta (Blair *et al.* 1993).

En términos generales no se presentaron eventos extremos de deficiencia hídrica que pudieran limitar en forma severa el rendimiento del cultivo. En el primer año, si bien la oferta hídrica (lluvias) resultó ajustada en relación a la demanda del cultivo, en la mayoría de los sitios se habría abastecido la demanda hídrica. Las excepciones fueron Arequito y Urquiza, los sitios con menores registros de lluvias. Considerando las escasas lluvias registradas durante el ciclo del cultivo, es posible que el agua almacenada en el perfil durante el barbecho, haya aportado en forma significativa a la oferta de agua, cubriendo el requerimiento hídrico del cultivo.

En el segundo año, la disponibilidad hídrica fue muy buena, con excedentes importantes en relación a la media regional (Figura 3.3).

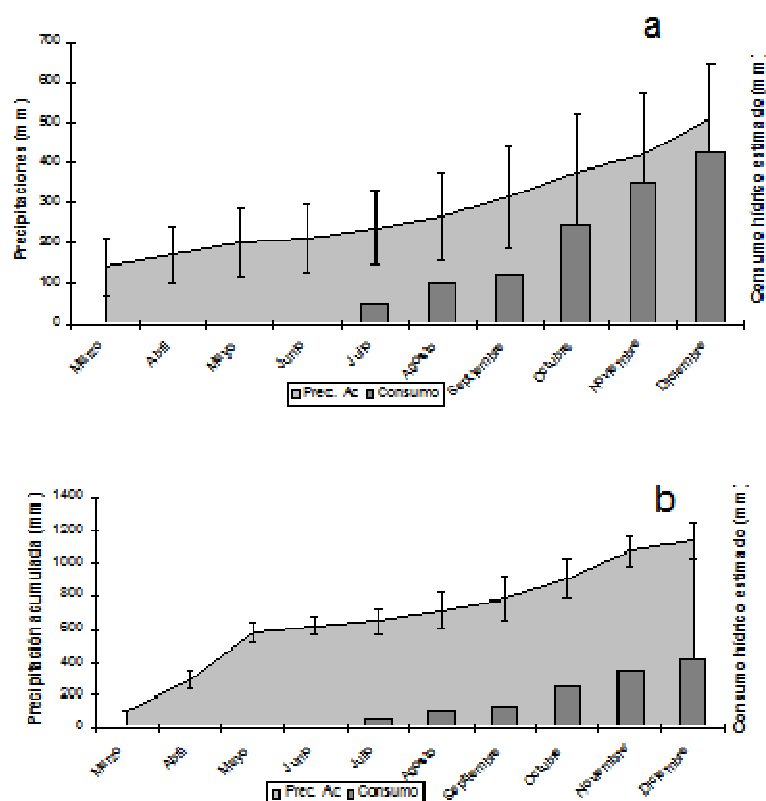


Figura 3.3.- Precipitación acumulada (mm, barbecho y ciclo del cultivo) y uso consuntivo de agua (estimado). a:año 1 (n=5). b:año 2 (n=3).

3.6.1.2.-Rendimientos y respuesta a la fertilización azufrada

La fertilización produjo respuesta significativa del trigo ($p < 0,05$) en el 80% de los sitios durante el primer año y en todos los sitios en el segundo año (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Rendimientos medios (kg ha^{-1}) de trigo en tratamientos sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S (año 1, $n=5$; año 2, $n=3$).

Sitio	Testigo	Fertilizado	Respuesta	Valor p
Año 1				
Urquiza	3513	3835	322	<0,01
Arequito	3287	3793	506	0,0001
Bolívar	3367	4087	720	0,0002
Alberti	3867	4724	857	0,0011
Pergamino	4186	4417	231	0,097
Año 2				
Alberti	2777	3641	864	0,011
Arequito	3686	4389	702	0,0007
Bragado	2116	4135	2119	0,0055

El rendimiento medio de todos los sitios del primer año fue de 3907 kg ha⁻¹ (mínimo=3287 kg ha⁻¹, máximo 4724 kg ha⁻¹) y en el segundo año 3457 kg ha⁻¹ (mínimo=2116 kg ha⁻¹, máximo 4389 kg ha⁻¹).

Las respuestas medias observadas en el primer año (600 kg ha⁻¹) fueron mayores a las observadas por Salvagiotti *et al.* (2004), Torres Duggan *et al.* (2006) y por FAO (2004), siendo similares a las reportadas por Reussi Calvo *et al.* (2006) en ensayos conducidos en el sudeste de Buenos Aires.

Al cabo del segundo año, se observaron respuestas medias más elevadas y con mayor variabilidad siendo la mínima respuesta de 702 kg ha⁻¹ (Arequito) y la máxima de 2119 kg ha⁻¹ (Bragado). Las mayores respuestas obtenidas en este último sitio se correspondieron con una severa deficiencia de S, reflejada en el bajo contenido de sulfatos iniciales (2,4 mg kg⁻¹ de S-SO₄²⁻ en el estrato de 0-20 cm, Tabla 3.1). El menor rendimiento del testigo en este sitio (2116 kg ha⁻¹) y los importantes incrementos de rendimiento por fertilización azufrada, indicarían una baja disponibilidad de S y condiciones ambientales favorables durante el período crítico para la definición del rendimiento (20 días antes y 10 días después de floración). Esto permitió la expresión de las respuestas al agregado de S. Coincidentemente, Anderson *et al.* (2006) reportaron elevadas respuestas a la fertilización azufrada (36 al 112 % sobre el testigo) en ambientes donde los testigos produjeron baja biomasa de grano, en suelos con bajos contenidos de sulfatos iniciales (media de 3,8 mg kg⁻¹ S-SO₄²⁻; 0-20 cm). En ese caso se utilizaron dosis similares a las evaluadas en esta tesis. Un amplio rango de respuestas a S también fue observado en una red de ensayos de campo conducidos en Región Pampeana, aunque en el cultivo de maíz (García *et al.* 2006). Los autores indicaron respuestas de 500 a 2400 kg ha⁻¹ en suelos deficientes en S con un rango de disponibilidad de S-SO₄²⁻ de 5-10 mg kg⁻¹ (0-20 cm). En cambio, en ensayos desarrollados en la misma área agro-ecológica por Salvagiotti *et al.* (2004) en el cultivo de trigo en suelos con contenidos similares de SO₄²⁻ iniciales, reportan respuestas inferiores a las obtenidas en esta tesis. Las bajas respuestas fueron atribuidas a problemas fitosanitarios (*Fusarium graminearum*) que determinaron bajos rendimientos en grano (1734-2717 kg ha⁻¹) ya que la disponibilidad edáfica de S (inicial + mineralizado) habría cubierto los requerimientos de S del cultivo.

3.6.1.3.-Relación entre las respuestas a la fertilización y variables edafo-climáticas

Las variables asociadas positivamente con las respuestas fueron: precipitaciones (macollaje, barbecho y totales del ciclo); contenido de MO y la CIC. La variable asociada negativamente con las respuestas fue el contenido de S-SO₄²⁻ a la siembra (0-20 cm) (Tabla 3.5)

Tabla 3.5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha^{-1}) al agregado de S y variables edafo-climáticas.

Variable	Coeficiente correlación (r)	Significación estadística (valor p).
MO	0,45	0,01
CIC	0,47	<0,01
S-SO ₄ ²⁻	-0,43	0,01
Precipitación en macollaje	0,76	<0,01
Precipitación en barbecho	0,54	<0,01
Precipitación total ciclo	0,60	<0,01
Temperatura en macollaje	-0,30	0,08
Temperatura media ciclo	-0,06	0,72

En cambio, no se detectó asociación alguna entre las respuestas y la temperatura en macollaje o la global del ciclo. Esto se debió, fundamentalmente, al estrecho rango explorado (poca variabilidad en temperaturas entre sitios y años).

La asociación positiva observada entre las respuestas a la fertilización azufrada y el contenido de MO o CIC del suelo, reflejan gradientes ambientales (i.e. variaciones en calidad de sitio) explorados en el conjunto de los experimentos.

Diferente es la tendencia respecto de la respuesta del trigo y el contenido de SO₄²⁻ medido a la siembra. Esta última variable se asoció inversamente con las respuestas, independientemente del contenido de MO o CIC del suelo. Debido a que algunos sitios presentaron interacción significativa ($p < 0,05$) fuente x dosis se realizó en primer lugar un análisis de regresión lineal entre las respuestas (variable respuesta) y el contenido de SO₄²⁻ iniciales (variable regresora o explicativa) para cada nivel de dosis (Tabla 3.6)

Tabla 3.6. Coeficientes de determinación lineal y bondad de ajuste (R^2) de ecuaciones de regresión lineal simple entre las respuestas al S y el contenido de S-SO₄²⁻ (mg kg^{-1}) en el suelo en el estrato de 0-20 cm.

Tratamiento	Pendiente (b)	Intercepto	R^2	P
SA ₁	-127	1468	0,25	<0,0001
AE ₁	-74	1193	0,13	<0,0001
SA ₂	-145	1765	0,24	<0,0001
AE ₂	-145	1765	0,24	<0,0001

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

Las diferencias entre interceptos y pendientes de las curvas de regresión para cada nivel de dosis (SA₁ vs AE₁ y SA₂ vs AE₂) y entre niveles de dosis (Dosis₁ vs Dosis₂) no fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$). Por lo tanto, se realizó una regresión conjunta entre las respuestas (medias de fuente y dosis) y la disponibilidad de

S-SO₄²⁻ en el suelo (0-20 cm) que resultó en un muy bajo, pero estadísticamente significativo, coeficiente de determinación lineal ($R^2=0,18$) (Figura 3.4).

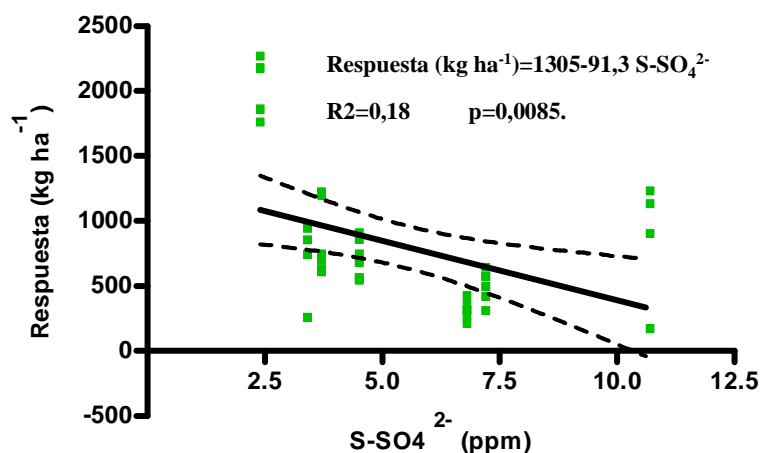


Figura 3.4. Relación entre las respuestas al agregado de S (fuentes y dosis integradas) y el contenido de S-SO₄²⁻ en el suelo (0-20 cm). Las líneas puntadas indican el intervalo de confianza del 95%.

La relación inversa y el bajo ajuste entre las respuestas y el contenido de SO₄²⁻ a la siembra coinciden con lo indicado por Gutiérrez Boem (2006), quien sugirió que las dificultades para encontrar relaciones estables entre las respuestas y el contenido de S-SO₄²⁻ a la siembra de los cultivos se podrían deber a diferentes causas (e.g. SO₄²⁻ por debajo de zona de muestreo o en napas cercanas, errores en la determinación de SO₄²⁻ en los extractos del suelo, etc.). En esta tesis, el gradiente ambiental explorado también contribuyó a que existan otras fuentes de variación no determinadas que incidieron en las respuestas a la fertilización azufrada.

3.6.1.4.-Efectos de fuente y dosis

Como fuera mencionado previamente, durante el primer año se observó efecto de tratamiento en el 80% de los sitios, mientras que en el segundo año, la fertilización presentó efectos significativos ($P<0,05$) en todos los sitios (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Rendimiento en grano de trigo (kg ha⁻¹) para los diferentes tratamientos de fertilización (año 1, n=5; año 2, n=3).

Año 1							
Sitio	Testigo	SA₁	SA₂	AE₁	AE₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
Urquiza	3513	4950	3935	4641	3635	607	0,0297
Arequito	3287	3777	3712	3926	3759	233	<0,0001
Bolívar	3367	3822	4117	4208	4201	403	0,0020
Alberti	3867	4456	4489	4353	4368	-	0,5192
Pergamino	4186	4959	5323	4443	3973	782	0,0030
Media	3636	4394	4315	4314	3987		
Máximo	4186	4959	5323	4641	4368		
Mínimo	3287	3777	3712	3926	3635		
Año 2							
Sitio	Testigo	SA₁	SA₂	AE₁	AE₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
Alberti	3686	4368	4406	4381	4406	430	0,0126
Arequito	2777	3257	3686	3560	3686	798	0,0418
Bragado	2146	4141	4620	3863	4014	848	0,0004
Media	2870	3922	4235	3935	4003		
Máximo	3686	4368	4620	4381	4406		
Mínimo	2146	3257	3680	3560	3590		

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

En la mayoría de los sitios-años no se observó efecto significativo de la fuente azufrada ni de la dosis aplicada o de la interacción fuente x dosis ($p>0,05$) (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Resumen del análisis de la variancia (valor p) para los factores fuente y dosis en los dos años de experimentos.

Año1			
Sitio	Fuente	Dosis	Fuente x Dosis
Urquiza	0,04	0,24	0,40
Arequito	0,23	0,15	0,52
Bolívar	0,10	0,30	0,28
Pergamino	<0,001	0,46	0,02
Año 2			
Arequito	0,33	0,19	0,90
Alberti	0,96	0,86	0,97
Bragado	0,15	0,27	0,64

Desde una perspectiva agronómica, el AE micronizado y el SA presentaron similar efectividad (i.e. efecto fuente). En cuanto al efecto de dosis, el primer nivel de S aplicado (10 kg ha⁻¹ de S en el primer año y 15 kg ha⁻¹ de S en el segundo año) resultaron suficientes para generar respuestas y satisfacer los requerimientos de S del cultivo.

El análisis de contrastes ortogonales permitió establecer que durante el primer año de ensayos, sólo en dos sitios (Pergamino y Urquiza) se observó diferente efectividad entre fuentes y/o interacción fuente x dosis (Tabla 3.9)

Tabla 3.9. Contrastes ortogonales expresados en kg ha⁻¹(SA-AE) para los diferentes sitios experimentales.

Año 1		
Sitio	Contraste	Valor p
Urquiza	205	0,057
Arequito	-31	0,24
Bolívar	-235	0,11
Pergamino	318 (SA ₁ -AE ₁)	0,33
	349 (SA ₂ -AE ₂)	0,012
Año 2		
Arequito	-339	0,21
Alberti	-9	0,94
Bragado	434	0,14

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

En Pergamino se detectó interacción significativa ($p < 0,05$) fuente x dosis, mientras que en Urquiza se observó una tendencia ($p = 0,057$) de mayor respuesta al SA en ambas dosis aplicadas.

En Pergamino la interacción se reflejó en una menor respuesta al agregado de S con AE en relación al SA en la dosis más alta de aplicación. Si bien no se midió la variación de pH en el suelo luego de la aplicación del fertilizante, la ocurrencia de fitotoxicidad causado por el fertilizante, parecería poco probable, ya que lo mismo se presenta con dosis muy superiores a las aplicadas en estos experimentos, como las utilizadas en corrección de suelos alcalinos. Las condiciones termo-hídricas tampoco resultaron restrictivas en este sitio. Por lo tanto, las posibles causas de la menor respuesta al agregado de S en Pergamino se puede deber a la acumulación de productos tóxicos o ácidos para la normal oxidación del AE o bien una reducida accesibilidad microbiana a los gránulos del AE (Chien *et al.*, 1988; Deng y Dick, 1990).

En Urquiza, la menor performance del AE pudo deberse a una disminución en la capacidad del AE para proveer sulfatos en este ambiente edáfico, teniendo en cuenta que las respuestas fueron más bajas con AE en los dos niveles de S aplicadas. Teniendo en cuenta que las temperaturas durante macollaje fueron similares entre los sitios experimentales, la menor eficiencia agronómica del AE puede ser relacionada con variables hídricas (e.g. distribución de lluvias y su efecto sobre la disgregación-disolución del AE) y/o edáficas. En Urquiza, al igual que en Arequito, las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron menores a 300 mm. En el resto de los sitios-año, las lluvias fueron mayores. De los sitios mencionados con menor precipitación (Urquiza y Arequito), solamente en Urquiza se observaron diferencias significativas en respuesta entre las fuentes azufradas. En este sitio, la menor oferta hídrica y el bajo contenido de MO pudo limitar la oxidación del AE, reduciendo su eficiencia agronómica. Así, es posible que se haya generado una interacción combinada entre la menor disponibilidad hídrica superficial (i.e. menor disgregación del AE) y el bajo contenido de MO. Estos resultados coinciden con Horowitz & Meurer (2007) quienes observaron una relación inversa y significativa entre la tasa de oxidación del

AE y el contenido de C orgánico en experimentos de incubación de suelos donde también se incluyeron otras variables edáficas: pH, P disponible, cationes, etc. Estas últimas variables analizadas, presentaron coeficientes de determinación lineal muy bajos y/o resultaron estadísticamente no significativos. Bajos contenidos de MO determinan una menor concentración de biomasa microbiana, limitando la oxidación del AE. Este sería el mecanismo subyacente que explicaría la relación inversa entre el contenido de C del suelo y la tasa de oxidación del AE.

En el mismo sentido que los resultados observados en esta tesis, Tysko & Rodríguez (2006) informaron respuestas significativas a la aplicación de una fuente de AE reactiva (granulometría fina) en tres de cinco sitios experimentales de la Región Pampeana. El rango de respuestas fue de 400-550 kg ha⁻¹ utilizando dosis de 24 y 40 kg ha⁻¹ de S. En cambio, Girma *et al.* (2005) reportaron una menor efectividad del AE en comparación al yeso en trigo, evaluando dosis elevadas de aplicación de S (56, 112 y 224 kg ha⁻¹ de S). En términos generales, observaron mayores respuestas con yeso que con AE. Solo en pocos sitios, donde se registraron lluvias intensas, el yeso mostró menor performance que el AE, posiblemente debido a pérdidas por lixiviación de SO₄²⁻. Los autores atribuyeron la baja eficiencia agronómica del AE a la menor liberación de SO₄²⁻ o a un posible efecto negativo de la acidificación del AE sobre el rendimiento del trigo, ya que utilizaron dosis de S bastante más elevadas que las aplicadas en fertilización de cultivos.

Las respuestas similares al agregado de S del AE respecto del SA indican que las condiciones requeridas para la oxidación del primero han sido adecuadas, pudiendo sincronizarse la demanda del cultivo y la biodisponibilidad del S proveniente del AE.

3.6.2. Experimentos en soja de primera

3.6.2.1.-Características climáticas de los años evaluados

Considerando el total de lluvias ocurridas durante el ciclo del cultivo (noviembre-marzo) y barbecho (abril-octubre), las precipitaciones del primer año de experimentos fueron un 20 % superiores que las del segundo: 920 mm (mínimo=833mm, máximo=1097) vs 751 mm (mínimo=693 mm, máximo 850 mm) (Figura 3.5)

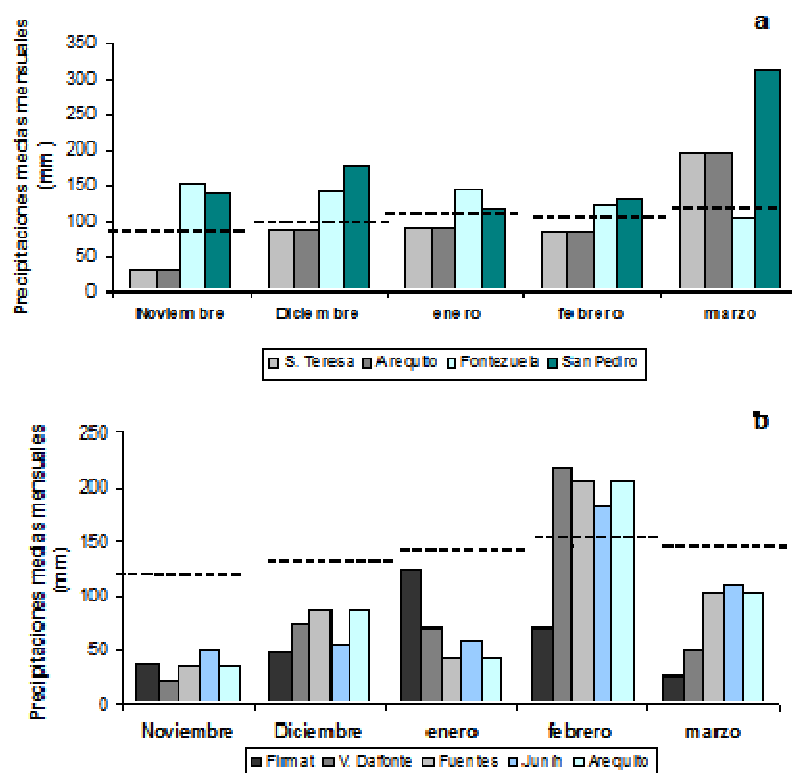


Figura 3.5.- Precipitación media mensual. a: año 1 (n=4). b: año 2 (n=5). La línea punteada indica la precipitación media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

La importancia relativa de las precipitaciones en el ciclo y barbecho, varió según el año considerado. Así, en el primer año de ensayos, las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo fueron de 629 mm (mínimo=492 mm, máximo 874 mm) y las del barbecho 291 mm (mínimo=223, máximo 341), mientras que en el segundo año, las lluvias durante el ciclo fueron de 415 mm (mínimo=302 mm, máximo 471 mm) y las del barbecho 350 mm (mínimo=226, máximo=417 mm).

En el primer año, las precipitaciones (ciclo+barbecho) fueron cercanas al promedio histórico regional (7,7% inferiores), con variaciones según sitio: -17; -6,5; +10,6; -17% para S. Teresa, Pergamino (Fontezuela), S. Pedro y Arequito, respectivamente. Durante el segundo año, las precipitaciones fueron un 28% inferior al registro histórico: -41, -15, -40, -19, -28% para Firmat, Pergamino (V. Dafonte), Fuentes, Junín y Arequito, respectivamente. En el sitio Fuentes, la baja oferta de lluvias durante el barbecho (40% inferior) coincidió con una distribución poco favorable de lluvias durante el ciclo del cultivo (concentradas hacia el final del ciclo), que deprimieron considerablemente el rendimiento.

La temperatura media mensual durante el ciclo del cultivo fue similar a la media histórica para la región de estudio durante el primer año (1,4% superior). Sin embargo, durante el segundo año, las temperaturas fueron en promedio un poco más elevadas que en el primer año (3,3% mayor a la media zonal), pero dos sitios presentaron temperaturas medias del ciclo un 9% mayor que la media: Fuentes y Arequito (Figura 3.6).

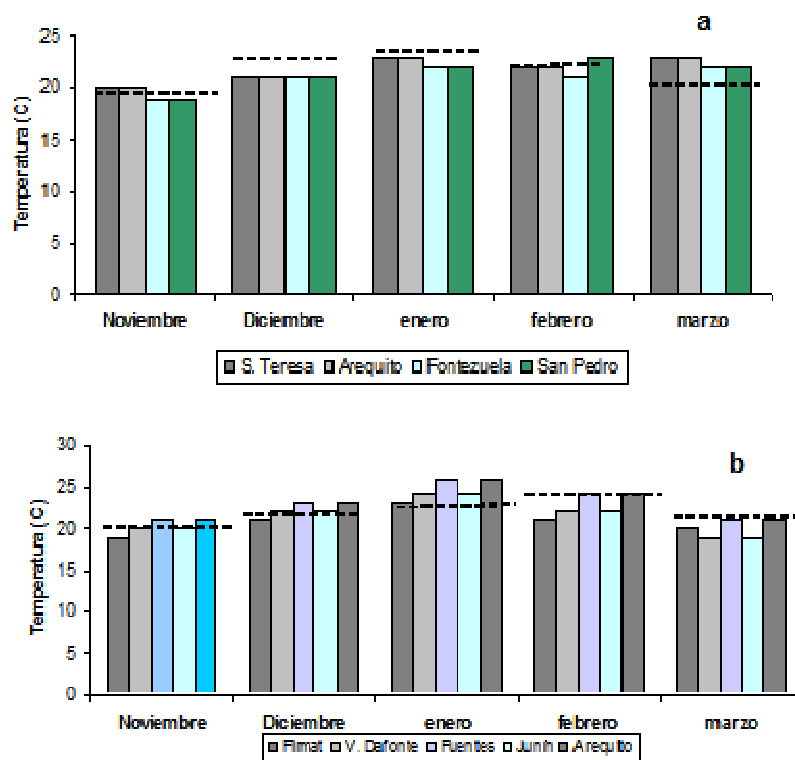


Figura 3.6. Temperatura media mensual para los dos años de experimentos. a:año 1 (n=4). b:año 2 (n=5). Las líneas punteadas indican la temperatura media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

El sitio Fuentes evidenció una sequía del tipo progresiva, como ya se mencionó. En Arequito se presentó la mayor temperatura durante el ciclo, pero una favorable distribución de las lluvias durante el período de floración y llenado de granos. Por eso, posiblemente, no se observaron reducciones en el rendimiento.

El rango de temperatura media durante el ciclo del cultivo fue de 19 a 23°C para el primer año y de 19 a 26°C para el segundo año. El segundo año, las temperaturas superaron levemente las medias de la serie climática histórica del período 1971-2000. Como era previsible en un cultivo estival, las temperaturas medias del ciclo superaron considerablemente los 4°C, temperatura debajo de la cual la velocidad de oxidación del AE es muy lenta (Blair *et al.* 1993). En comparación con la temperatura en macollaje del trigo (8- 11°C), las temperaturas registradas en la soja de primera se ubicaron más cerca del óptimo para la oxidación del azufre elemental.

Desde el punto de vista del balance hídrico, el primer año presentó mayor diferencia o margen entre la oferta hídrica (barbecho+ciclo del cultivo) y la demanda hídrica o uso consuntivo (Figura 3.7).

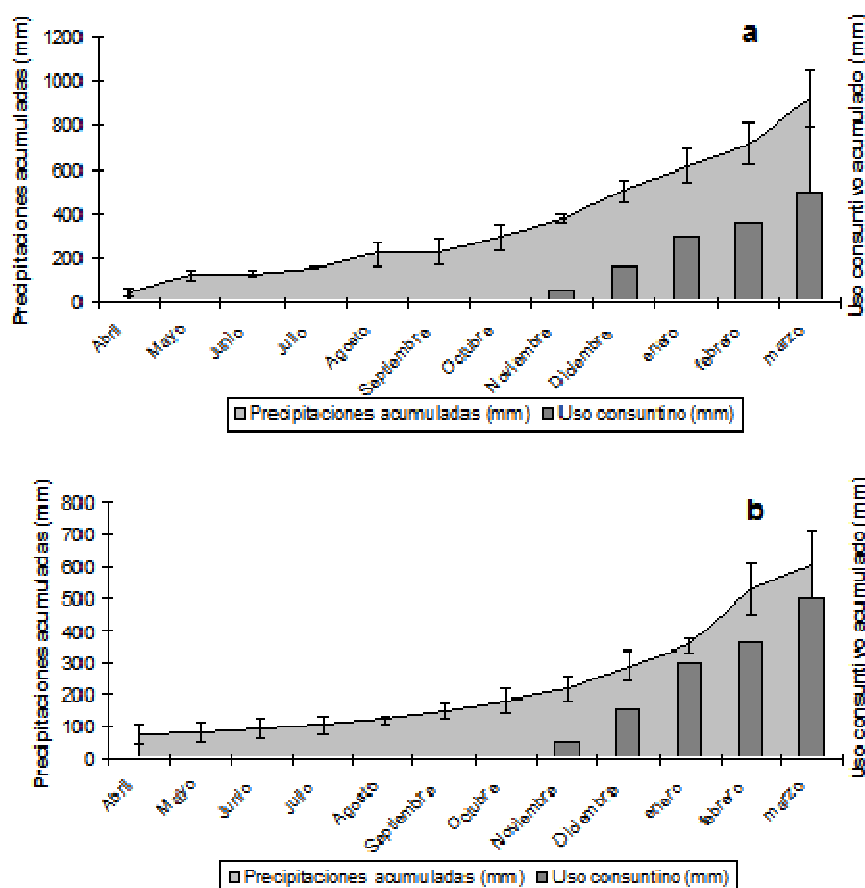


Figura 3.7.- Precipitación acumulada (mm, barbecho y ciclo del cultivo) y uso consuntivo de agua (estimado). a: año 1 (n=4) b: año 2 (n=5). El uso consuntivo es el reportado por Andriani (2000).

3.6.2.2.-Rendimientos y respuesta a la fertilización azufrada

A diferencia de lo observado en los ensayos de trigo, en los experimentos de soja de primera, se observó una baja frecuencia de sitios con respuesta significativa ($P < 0,05$) a la fertilización azufrada (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Rendimientos medios (kg ha^{-1}) de soja tratamientos sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S (año 1, n=4; año 2, n=5).

Sitio	Testigo	Fertilizado	Respuesta	Valor p
Año 1				
S. Pedro	3089	4071	982	<0,01
Arequito	3528	3993	465	0,13
S. Teresa	4590	4966	377	0,09
Pergamino	4025	4433	408	0,15
Año 2				
Fuentes	1276	1636	361	<0,01
Arequito	4291	4646	356	0,04
Firmat	3217	3507	291	0,06
Junín	2630	2909	279	0,11
Pergamino	2556	2707	151	0,40

El rendimiento medio del primer año fue de 4032 kg ha^{-1} (mínimo= 3089 kg ha^{-1} , máximo 4966 kg ha^{-1}), considerablemente mas alto que el promedio regional. Por el

contrario, en el segundo año, la productividad media fue de 3142 kg ha⁻¹, y con mayor variabilidad entre sitios (mínimo=1276 kg ha⁻¹, máximo 4646 kg ha⁻¹).

La respuesta promedio del primer año de experimentos fue de 558 kg ha⁻¹ con un mínimo de 377 kg ha⁻¹ y un máximo de 982 kg ha⁻¹. Estas respuestas son mayores a las reportadas en la Región Pampeana (200-500 kg ha⁻¹) por la FAO (2004) con dosis de 5-20 kg ha⁻¹ en forma de SO₄²⁻. En cambio, las respuestas durante el segundo año de experimentos fueron menores, con una media de 297 kg ha⁻¹ (mínimo=151 kg ha⁻¹, máximo=361 kg ha⁻¹) similares a las observadas por otros autores, tanto en la Región Pampeana (Gutiérrez Boem *et al.* 2007) como en otras regiones agro-ecológicas como suelos Vertisoles de regiones semi-áridas tropicales de la India (Ganeshamurthy & Sammi Reddy, 2000) o en suelos Alfisoles de EE.UU (Chen *et al.* 2005).

Sin embargo, en los sitios donde no se observó respuesta a la fertilización al 5% de significación, se observaron tendencias estadísticamente significativas con un rango de significación p=0,09-0,15. Estos resultados coinciden con lo reportado por Díaz Zorita *et al.* (2002), en una extensa red de ensayos de fertilización azufrada realizada en soja en la Región Pampeana. En esa red de experimentos, en solo 10 sitios de los 47 evaluados, obtuvieron respuestas significativas al agregado de S (p<0,10). En estos experimentos, la respuesta media fue de 318 kg ha⁻¹, con un mínimo de 231 y un máximo de 404 kg ha⁻¹, respectivamente. En todos los ensayos mencionados, las fuentes azufradas utilizadas fueron solubles en agua.

3.6.2.3.-Relación entre las respuestas a la fertilización y variables edafo-climáticas

En las Tablas 3.11 y 3.12 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos entre las respuestas al agregado de S (trat. Fertilizado-trat. Testigo) y variables edafo-climáticas. El análisis de correlación se realizó para cada año por separado, ya que se observó efecto significativo de la variable “año” (P<0,05).

Tabla 3.11. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha⁻¹) al agregado de S y variables edafo-climáticas en el primer año de ensayos.

Variable	Coeficiente correlación (r)	Significación estadística (valor p)
MO	0,83	0,17
CIC	0,19	0,81
S-SO ₄ ²⁻	0,48	0,52
Precipitación en ciclo	0,88	0,12
Precipitación en barbecho	-0,68	0,32
Precipitación (ciclo + barbecho)	0,98	0,02
Temperatura media en ciclo	-0,15	0,85

Tabla 3.12. Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha^{-1}) al agregado de S y variables edafo-climáticas en el segundo año de ensayos.

Variable	Coeficiente correlación (r)	Significación estadística (valor p)
MO	-0,22	0,72
CIC	-0,19	0,76
S-SO ₄ ²⁻	-0,80	0,10
Precipitación en ciclo	0,20	0,75
Precipitación en barbecho	-0,85	0,07
Precipitación (ciclo + barbecho)	-0,84	0,08
Temperatura media en ciclo	0,55	0,23

Primer año de experimentos

Para los experimentos conducidos durante el primer año, en términos generales, no se obtuvieron relaciones robustas y significativas entre la respuesta a la fertilización azufrada y las variables edafo-climáticas evaluadas. Sin embargo, se detectó una relación positiva entre las respuestas con el contenido de MO y las precipitaciones ocurridas en el ciclo del cultivo, pero a nivel de tendencia ($0,12 < P < 0,17$). La asociación entre las respuestas y las lluvias totales (ciclo+barbecho) fue positiva y estadísticamente significativa al 5%.

Para la variable S-SO₄²⁻ (0-20 cm), en este grupo de experimentos no se dispuso de variabilidad o rango para explorar, ya que la mayoría de los suelos presentaban valores medios a bajos.

Las respuestas a la fertilización azufrada no se correlacionaron con el contenido de S-SO₄²⁻ en el suelo (0-20 cm). Así, en sitios como S. Pedro, el incremento en la biomasa de grano estuvo cerca de 1000 kg ha^{-1} en un suelo con 11,3 ppm de S-SO₄²⁻ (0-20 cm) y en Pergamino las respuestas de 400 kg ha^{-1} se observaron con contenidos de S-SO₄²⁻ (0-20 cm) de 12 ppm. Estos resultados coinciden con lo reportado por diferentes investigadores de EE.UU, que reportan una pobre performance del análisis de suelos para diagnosticar de un modo consistente las respuestas a la fertilización azufrada (Camberato *et al.* 1998). Por el contrario, en Brasil el análisis de suelos es muy utilizado y disponen de umbrales para definir sitios con y sin probabilidades de responder al agregado de S. Así, Stipp & Casarin (2010) reportan umbrales de S-SO₄²⁻ entre 3 y 9 mg kg^{-1} para diversos cultivos y regiones con suelos con contenidos de arcilla inferiores al 40%. El mencionado límite crítico es utilizado para la capa superficial (0-20 cm) y sub-superficial (20-40 cm).

La falta de relación entre las respuestas y el contenido de S-SO₄²⁻ observados en los experimentos de la tesis, fueron reportados por otros autores en la misma región edafo-climática (García y Melgar, 2001; Díaz Zorita *et al.* 2002; Gutiérrez Boem *et al.* 2007).

Es interesante destacar que los sitios donde se realizaron los experimentos correspondientes al primer año presentaban un promedio de MO de $33,7 \text{ g kg}^{-1}$

(mínimo=25 g kg⁻¹, máximo 45 g kg⁻¹), mayor a 25 g kg⁻¹ de MO, considerado un valor crítico, a partir del cual un suelo se lo considera bien provisto de MO en la región de estudio (Pilatti *et al.* 2005). Por lo tanto, es posible que el gradiente de contenidos de MO y precipitaciones (ciclo o ciclo+barbecho) exploradas en este grupo de experimentos estén reflejando gradientes de calidad o potencial de sitio.

Los mayores rendimientos alcanzados en los tratamientos testigo (sin agregado de S) durante el primer año de ensayos, comparado con el segundo año de experimentos (3800 vs 2794 kg ha⁻¹), reflejan diferencias climáticas importantes entre años. Las condiciones más favorables para la generación de biomasa de grano durante el primer año (mayor oferta hídrica en el período de llenado de granos) para la mayoría de los sitios, incrementaron la demanda de S del cultivo. En los sitios donde se observaron respuestas significativas y/o tendencias en incremento del rendimiento por fertilización azufrada, es posible que la contribución de S por mineralización haya sido insuficiente para satisfacer la demanda de S del cultivo (no medido en esta tesis).

Sin embargo, la baja proporción de sitios con respuestas significativas al agregado de S posiblemente tenga relación con menores requerimientos de S en relación a los promedios indicados en la bibliografía internacional. En este sentido, Ferraris *et al.* (2002), evaluando una extensa red de ensayos de fertilización conducida en soja de primera en la misma región agro-climática (46 sitios, durante dos años), atribuyó la baja frecuencia de sitios con respuestas significativas a la fertilización azufrada a los bajos requerimientos de S medidos. Así, el rango de requerimiento indicado por el autor fue de 2,72-4,67 kg de S por tonelada de grano producida y los índices de cosecha de S fueron de 0,79-0,85. Estos requerimientos son sensiblemente menores a los promedios reportados por revisiones como la de Ciampitti & García (2007).

La relación directa entre las respuestas y el contenido de MO del suelo, se podría vincular con la capacidad de mineralización de los sitios. Existe evidencia experimental local sobre la relación directa entre la textura y el contenido de MO de los suelos en una amplia gama de regiones que incluye la región semiárida, la pampa arenosa, y parte de la pampa ondulada (Álvarez & Lavado, 1998; Álvarez & Steinbach, 2006). Considerando estos antecedentes, suelos con mayor MO implica una relación MO/arcilla más baja. Los compuestos orgánicos se encuentran más protegidos para ser degradados por los organismos responsables de la mineralización. En este sentido, Ferraris *et al.* (2002) propuso, para sitios con baja variabilidad, un modelo de regresión múltiple integrado por contenido de S-SO₄²⁻ (0-60 cm) y la relación MO/arcilla, las dos variables se asocian en forma inversa con las respuestas. Este modelo permitió explicar el 70% de la variación en las respuestas al agregado de S en esa red de experimentos.

Segundo año de experimentos

Durante el segundo año de experimentos, a diferencia de lo observado en el primer año, no se detectó asociación entre las respuestas y el contenido de MO. Se pudo detectar, por el contrario, una asociación inversa y estadísticamente significativa ($P=0,10$) entre las respuestas y el contenido de S-SO₄²⁻ ($R^2=0,63$). Sin embargo, solamente se dispuso de un sitio con alto contenido de S-SO₄²⁻ (Pergamino), por lo cual la relación es poco robusta. En la Figura 3.8 se muestra la relación entre las respuestas (medias de fuentes y dosis) y el contenido de S-SO₄²⁻ en el suelo (0-20 cm). Se integraron las dos fuentes azufradas ya que no se observaron diferencias en paralelismo

de pendientes entre las rectas de ajuste de cada una de las fuentes ($P=0,26$). Se observa una reducción en las respuestas de 33 kg ha^{-1} por cada ppm de S-SO_4^{2-} de incremento en la disponibilidad de S del suelo (0-20 cm). Con una disponibilidad levemente superior a 10 ppm de S-SO_4^{2-} se alcanzan las menores respuestas observadas.

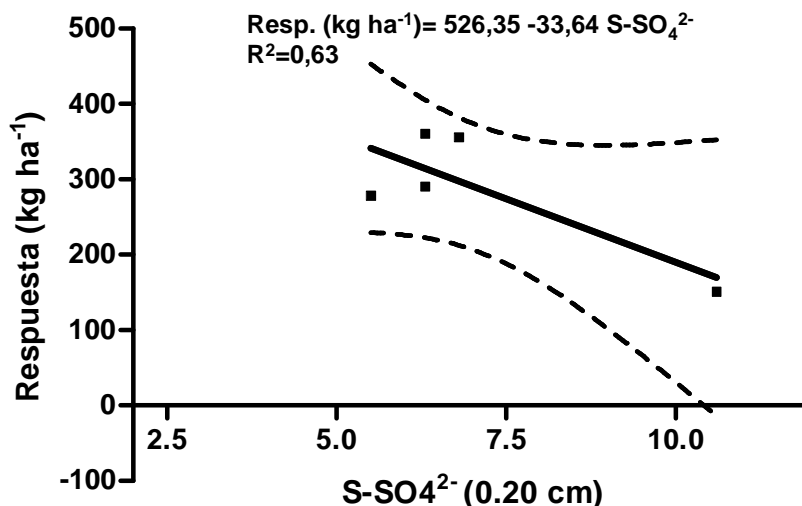


Figura 3.8. Relación entre la respuesta a la fertilización azufrada (media de fuentes y dosis) y el contenido de S-SO_4^{2-} (0-20 cm).

Resultados similares fueron observados por Espósito *et al.* (2008) en suelos con semejantes contenidos de MO de la provincia de Córdoba. Estos autores detectaron un nivel crítico de 9 ppm de S-SO_4^{2-} (0-20 cm) y un rango de respuesta a la fertilización azufrada de 100-500 kg ha^{-1} .

Se observó una asociación inversa entre las respuestas y las precipitaciones durante el barbecho o las globales (ciclo + barbecho), pero no con las lluvias ocurridas durante el ciclo (Tabla 3.11).

En este segundo año de experimentos, el grupo de suelos presentó un contenido medio de MO menor a 25 g kg^{-1} , considerado bajo para la región de estudio (Pilatti *et al.* 2005). La media de los sitios fue de $16,2 \text{ g kg}^{-1}$ de MO, con un mínimo de 10 g kg^{-1} y un máximo de 19 g kg^{-1} . Si bien la relación entre las respuestas y esta variable no fue significativa, es posible que el menor contenido de MO de los sitios haya implicado menores aportes de S mineralizado, ya que no son esperables en la región de estudio otras fuentes alternativas de provisión de S como las atmosféricas. Estas últimas pueden ser relevantes en áreas cercanas al mar o en centros industriales (Haneklaus 2007; Tabatabai 2005), que no se presentaron en los experimentos evaluados. Por lo tanto, la mineralización de S representó la principal fuente de provisión de S en los sitios, además del S aplicado como fertilizante. Esta hipótesis fue verificada por Fontanetto *et al.* (2009), quienes pudieron determinar, en el cultivo de soja, una clara relación inversa entre la capacidad de mineralización del suelo y la respuesta al S.

3.6.2.4. Efectos de fuentes y dosis

En los sitios donde se observaron efectos de tratamiento (i.e. efecto de la fertilización azufrada) en el primer año, no se detectaron efectos significativos de fuente ($p>0,05$) ni interacción fuente x dosis, pero se observaron efectos de dosis. En el segundo año, de los dos sitios donde hubo efectos de tratamiento al 5%, en uno de ellos, se observó efecto de fuente y dosis, mientras que en el otro sitio se detectó efecto de fuente pero no de dosis (Tablas 3.13 y 3.14).

Tabla 3.13. Rendimiento en grano de soja de primera (kg ha^{-1}) para los diferentes tratamientos de fertilización (año 1, $n=4$; año 2, $n=5$).

Año 1							
Sitio	Testigo	SA₁	SA₂	AE₁	AE₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
San Pedro	3089	3987	4270	3881	4147	570	0,012
Arequito	3528	3564	4190	3696	4522	803	0,07
S. Teresa	4590	5220	4927	4927	4792	-	0,26
Pergamino	4025	4163	4830	4370	4370	-	0,23
Media	3808	4233	4554	4218	4457		
Mínimo	3089	3564	4190	3696	4147		
Máximo	4590	5220	4927	4927	4792		
Año 2							
Sitio	Testigo	SA₁	SA₂	AE₁	AE₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
Fuentes	1276	1831	1631	1699	1386	189	<0,01
Arequito	4291	4930	4697	4230	4731	438	0,013
Firmat	3217	3675	3332	3593	3430	-	0,14
Junín	2630	2788	2945	2976	2926	-	0,48
Pergamino	2556	2740	2913	2361	2815	-	0,14
Media	2784	3192	3103	2871	3057		
Máximo	4241	1831	4697	4230	4731		
Mínimo	1276	4930	1631	1699	1386		

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

Tabla 3.14. Resumen del análisis de variancia (valores p) para los factores fuente, dosis y fuente x dosis de los dos años de experimentación.

Año1			
Sitio	Fuente	Dosis	Fuente x Dosis
San Pedro	0,27	0,017	0,93
Arequito	0,24	0,002	0,60
Año 2			
Fuentes	0,02	<0,01	0,48
Arequito	0,03	0,37	0,021

La efectividad de las fuentes azufradas fue similar durante el primer año de experimentos, lo que significa que no se observaron diferencias significativas entre el rendimiento medio con SA y con AE (Tabla 3.15).

Tabla 3.15. Contrastes ortogonales expresados en $\text{kg ha}^{-1}(\text{SA-AE})$ para los diferentes sitios experimentales.

Año 1		
Sitio	Contraste	Valor p
San Pedro	167	0,23
Arequito	-298	0,39
Año 2		
Fuentes	254	<0,01
Arequito	700 ($\text{SA}_1\text{-AE}_1$)	<0,01
	-34 ($\text{SA}_2\text{-AE}_2$)	0,87

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

En el segundo año, de los dos sitios donde se registraron efectos de tratamiento, en uno de ellos (Fuentes) la respuesta con SA fue mayor que con AE, mientras que en el otro sitio (Arequito), las respuestas dependieron de la dosis considerada (interacción fuente x dosis)(Tabla 3.15). En este sitio, con la dosis más baja (15 kg ha^{-1} de S) el SA fue más efectivo que el AE. Por el contrario, con la mayor dosis (30 kg ha^{-1} de S) las diferencias en respuestas entre fuentes no fueron significativas ($p>0,05$).

La mayor respuesta del SA comparada con el AE en el sitio Fuentes, coincidió con una baja ocurrencia de lluvias posteriores a la fertilización, sobre un suelo que había presentado un barbecho relativamente seco. La oxidación del AE se maximiza cuando el contenido hídrico del suelo es próximo a capacidad de campo, pero se reduce considerablemente con sequía o con excesos hídricos (Tisdale *et. al.*, 1993; Germida & Janzen, 1993; Boswell & Friesen, 1993; Tabatabai, 2005). Cuando la disponibilidad hídrica es baja, no se forma el film de agua alrededor de las partículas del AE que es necesario para el contacto entre los organismos edáficos y el fertilizante, lo que conduce a la oxidación del mineral. En situaciones de exceso hídrico, la menor oxidación se relaciona con la limitación para la difusión e intercambios de iones y gases (e.g. H^+ y SO_4^{2-} , oxígeno, CO_2), entre las partículas del AE y el medio edáfico. En este sitio se observó una marcada y evidente sequía progresiva, que limitó considerablemente la biomasa de grano obtenida. En este contexto, resultó más efectivo el SA que no requiere de un período de oxidación para proveer SO_4^{2-} , sino simplemente su incorporación a través de una lluvia luego de su aplicación, condición que se cumplió (Figura 3.9).

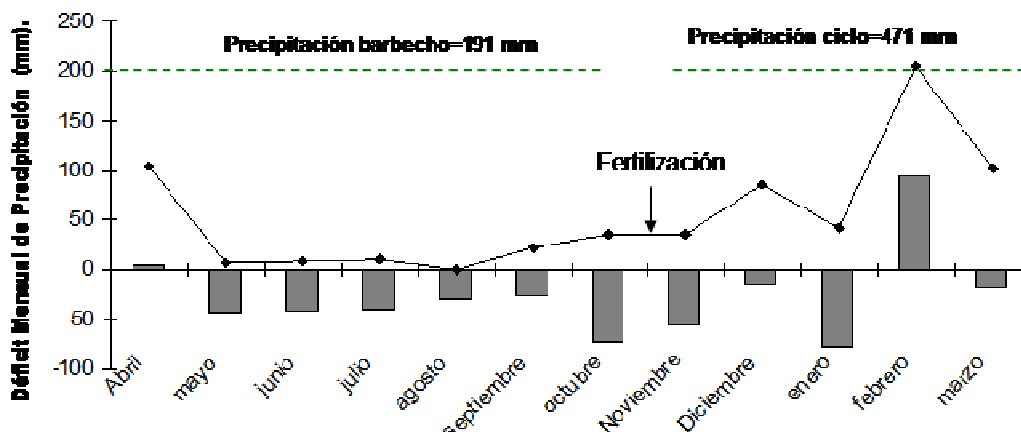


Figura 3.9. Distribución de precipitaciones (líneas) y déficit mensual de precipitación en relación a la serie climática (0=media). Sitio Fuentes (Año 2).

En Arequito, no resulta sencillo determinar la causa de la menor efectividad agronómica del AE en el primer nivel de dosis, en relación a la dosis más alta. Se plantean dos posibles hipótesis alternativas. En este sitio, no se presentaron limitaciones hídricas relevantes, hecho que se evidencia en el elevado rendimiento de los tratamientos testigo (>4000 kg/ha). La dosis de aplicación de S y la tasa de oxidación del AE se relacionan en forma directa en una amplia variedad de condiciones (Germida & Janzen, 1993). Así, la menor dosis de S implicaría menor superficie de contacto entre el mineral y los organismos encargados de la oxidación del mismo, determinando una baja provisión de S-SO_4^{-2} al cultivo. Por otra parte, el contenido de MO del sitio fue relativamente bajo (1,6%), pudiendo reducir la performance del AE. La MO edáfica constituye la principal variable de suelos en incidir en la oxidación del AE (Germida & Janzen, 1993; Horowitz & Meurer, 2007). La otra alternativa es que se haya producido una baja dispersión del AE en el suelo, generándose alrededor de las partículas de AE productos tóxicos (e.g. ácidos) que inhiben la oxidación del mineral (Chien *et al.*, 1988; Deng y Dick, 1990).

3.6.3.-Eficiencia comprada de las fuentes azufradas en los ciclos de trigo y soja de primera

El análisis conjunto de los sitios indica que no se observaron diferencias estadísticamente significativas en eficiencia agronómica ($P>0,05$) entre el SA y el AE, tanto en trigo como en soja de primera (Tablas 3.16; 3.17; 3.18; 3.19).

Tabla 3.16. Eficiencia de fertilización azufrada (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) de experimentos de trigo (primer año). Prueba T bilateral.

	10 kg S ha ⁻¹		30 kg S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	76	68	23	12
EE	22	16	7	5
N	5	5	5	5
p (SA vs AE)	0,77		0,23	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar.

Tabla 3.17. Eficiencia de fertilización azufrada (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) de experimentos de trigo (segundo año). Prueba T bilateral.

	15 kg S ha ⁻¹		30 S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	70	71	46	39
EE	32	22	19	12
N	3	3	3	3
P (SA vs AE)	0,98		0,77	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar.

Tabla 3.18. Eficiencia de fertilización azufrada (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) de experimentos de soja de primera (primer año). Prueba T bilateral.

	10 kg S ha ⁻¹		30 S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	43	41	25	22
EE	20	13	6	7
N	4	4	4	4
P (SA vs AE)	0,95		0,74	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar.

Tabla 3.19. Eficiencia de fertilización azufrada (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) de experimentos de soja de primera (segundo año). Prueba T bilateral.

	15 kg S ha ⁻¹		30 S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	27	13	11	9
EE	7	8	2	2
N	5	5	5	5
P (SA vs AE)	0,20		0,59	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar.

La eficiencia agronómica fue más elevada con el menor nivel de dosis y mayor en el segundo nivel de dosis, independientemente del tipo de fuente azufrada.

La eficiencia agronómica de las fuentes fue independiente de las condiciones climáticas evaluadas (temperatura media mensual y precipitaciones). En trigo, a pesar de la menor temperatura media y precipitaciones en macollaje comparado a soja de primera, la eficiencia de las fuentes fue similar, en la mayoría de los sitios. En concordancia, en soja de primera, a pesar de las mejores condiciones termo-hídricas para la oxidación del AE, los resultados fueron similares a los observados en trigo. En la Tabla 3.20 se muestra las diferencias en temperatura y precipitación entre el ciclo de trigo y de soja de primera.

Tabla 3.20. Temperatura media (°C) y precipitación acumulada (mm) en trigo y soja de 1ra. Entre paréntesis se indica el desvío estándar. Para cada año, letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticamente significativas al 5%.

	Año 1		Año 2	
	Trigo	Soja 1ra	Trigo	Soja 1ra
Temperatura*	10,8 (1,09) a	21,5 (0,38) b	8,3 (2) a	21,9 (1) b
Precipitaciones**	304 (61) a	629 (181) b	519 (62) a	426 (72) a

* Temperatura en macollaje para trigo y media de ciclo en soja de 1ra. **Media acumulada en ciclo.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Friesen (1991), quienes observaron la misma efectividad entre el AE (e.g. polvo y granulado) y fuentes sulfatadas como yeso y SPS en experimentos conducidos en climas semiáridos y subhúmedos de África. Las dosis de máxima respuesta detectada por los autores se presentaron en el rango de 5-10 kg ha⁻¹ de S.

La elevada eficiencia agronómica observada con el AE micronizado utilizado en los experimentos evaluados en esta tesis, resulta coherente con lo indicado por Boswell & Friesen (1993). Estos autores realizaron una extensa caracterización y revisión de la aptitud de diferentes fuentes de AE para diferentes regiones agro-ecológicas de Nueva Zelanda. Determinaron que el factor fundamental que regula el proceso de oxidación es el tamaño de las partículas del AE aplicado, recomendando la aplicación de fuentes de AE con granulometrías menores a 150 y 250 µm, para condiciones climáticas templadas y frías, respectivamente, y pluviometrías similares o mayores a las de la Región Pampeana. En los experimentos de esta tesis, la fuente de AE utilizada presentó una granulometría de 200 µm, considerada de alta velocidad de oxidación en el suelo (reactiva) según la bibliografía (Boswell & Friesen, 1993). Sin embargo, estos autores alertaron que no es recomendable extrapolar directamente los resultados, ya que el factor local del sitio (e.g. tipo de organismos capaces de oxidar el AE, prácticas de manejo, rotaciones de cultivos, etc.) puede variar notablemente entre regiones, aún en condiciones donde la precipitación o temperatura son similares. De ahí la relevancia de disponer de información acerca de cómo inciden las variables climáticas sobre la eficiencia del AE relativa a fuentes solubles, en las condiciones específicas de los agro-ecosistemas pampeanos.

A diferencia de los resultados obtenidos en esta tesis, Franzen & Grant (2008), reportaron que para las condiciones de los “Great Plains” de EE.UU, los resultados de la fertilización azufrada son generalmente maximizados cuando se aplican fuentes sulfatadas solubles, como SA, tiosulfato de amonio o yeso, en relación al AE. En países como Nueva Zelanda o Australia, donde se dispone de recomendaciones de diferentes tipos de AE para distintas regiones agro-climáticas, las mismas están basadas en un profundo conocimiento de los factores locales que regulan la oxidación del AE en diferentes tipos de suelos y climas. Estos estudios previos, integran mediciones de variables físicas, químicas y biológicas que inciden en la tasa de oxidación del AE (Boswell & Friesen, 1993).

3.7.Consideraciones finales

Los resultados obtenidos en el presente capítulo permiten extraer las siguientes conclusiones respecto de la hipótesis postulada:

La necesidad de oxidación del AE reduce la respuesta y eficiencia de uso del S (EUS) comparado con el sulfato de amonio en trigo. Por el contrario, ese efecto es de menor magnitud en soja de primera, debido a las condiciones termo-hídricas más favorables.

La hipótesis se rechaza. Los resultados obtenidos permitieron determinar que las respuestas y eficiencia agronómica (kg de grano kg de S aplicado⁻¹) de las fuentes azufradas fue similar, tanto en trigo como en soja de primera, cuando se analizaron en forma conjunta los experimentos. El importante contraste ambiental (temperatura y precipitaciones) explorado a través de los experimentos en estos cultivos con diferentes ciclos, permite concluir, que para el tipo de fuente de AE utilizada y para el área agro-ecológica de estudio, las dos fuentes azufradas fueron adecuadas para proveer S-SO₄²⁻ a los cultivos. Sin embargo, se observaron algunos sitios-años, donde la respuesta al agregado de S fue menor con AE que con SA, debido a factores específicos de sitio.

3.8. BIBLIOGRAFIA

- Alvarez, R.; Steinbach, H.S., 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados. R. Álvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 p.
- Álvarez, R., Lavado, R.S. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils. *Geoderma* 83: 127-141
- Andriani, J.M. 2000. El agua en los sistemas productivos. Para mejorar la producción. Edición SAGPy A y el INTA-EEA Oliveros, Santa Fe N°13. 72 p.
- Abeledo, G.L.; Alzueta, I.; De Abelleyra, D. Miralles, D.J. 2005. Programa CONOTRIGO. Cátedra de Cerealicultura. Facultad de Agronomía (UBA).
- Anderson, G.C., Fillery, I.R.P., Ripper, F.H., Leach, B.J. 2006. Sulfur mineralization in coarse-textured soil after different sulfate fertilisation histories, and yield responses of wheat and lupin. *Australian Journal of Soil Research*. 44, 165-174.
- Bixby, D.W., Beaton, J.D. 1970. Sulphur-containing fertilizers. Properties and Applications. Technical Bulletin Number 17. The Sulphur Institute. 27 p.
- Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., Dana, M., Anderson, G.C. 1993. Modelling of sulphur oxidation from elemental sulfur. *Plant and Soil*. 155/156: 379-382.
- Boswell, C.C., Friesen, D.K. 1993. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures. *Fertilizer Research*. 35:127-149.

- Bray, R.H., Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.*(59): 39-45
- Camberato, J.J., Grant, C.A.; Hart, J.M., almond, R.E., Messick, D.L., Meyer, R.D., Mitchell, C.C., Rehn, G. W. 1998. 4. Testing for Sulphur. In: Roundtable on preventing and correcting sulphur deficiencies in wheat. American Society of Agronomy Meeting. Seattle, Washington, USA. Proceedings. 25 p.
- Chen, L., Dick, W.A., Nelson, S. 2005. Flue gas desulfurization products as sulphur sources for Alfalfa and soybean. *Agron. J.* 97: 265-271.
- Chien, S.H., Friesen, D.K., Hamilton, B.W. 1988. Effect of application method on availability of elemental sulfur in cropping sequences. *Soil Science*. Vol 52 165-169 p.
- Ciampitti, I.A.; García, F.O. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. *Informaciones Agronómicas* N° 33, *Archivo Agronómico* N° 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. Available in <http://www.ipni.net/lasc>
- Cordone G. y F. Martinez. 2001. Efecto de la aplicación de distintas dosis de nitrógeno y azufre sobre el rendimiento de del doble cultivo trigo-soja. Para mejorar la producción 18-SOJA-EEA Oliveros, INTA.
- Deng, S., Dick, R.P. 1990. Sulfur oxidation and rhodanese activity in soils. *Soil Science*. Vol 150 N°2. 552-560 p.
- Diáz Zorita, M., García F., Melgar, R. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la Región Pampeana. Resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar-INTA. Campaña 2000/2001 y 2001/2002. 43 p.
- Echeverría, H.E. 2005. Azufre. En: *Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos*. H. Echeverría y F. García, Editores. Ediciones INTA. 525 p.
- Espósito, G.P., Castillo, C.A.; Balboa, R.; Balboa, G. 2008. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. En: *Actas del XXI Congreso de la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina.
- Fan, M.X., Messick, D. L. 2007. Correcting Sulphur Deficiency for Higher Productivity and Fertilizer Efficiency. The Sulphur Institute (TSI). Washington. United States. 11 p.
- FAO, 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 p.
- Ferraris, G. 2002. Pautas para el diagnostico de la fertilidad azufrada en soja. Tesis para optar al Grado de Magíster Scientiea. Escuela para Graduados "Alberto Soriano". Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

- Fontanetto, H., Keller, O., Albrecht, J., Giailevra, D., Negro, C., Belotti, L. 2009. Manejo de la fertilización de la soja en la región pampeana norte y en el NOA argentino. En: Actas de Simposio "Fertilidad 2009". Mejores Prácticas de Manejo para una Mayor Eficiencia en la Nutrición de los Cultivos. García, F. y Ciampitti, I (editores).
- Franzen, D.; Grant, C.A. 2008. Sulfur response based on crop, source, and landscape position. Chapter 7. En: Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition. Joseph Jez (Editor). Agronomy Monograph N°50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Friesen, D.K. 1991. Fate and efficiency of sulfur fertilizer applied to food crops in West Africa. *Fertilizer Research*. 29 (44): 35-44.
- Ganeshamurthy, A.N., Sammi Reddy, K. 2000. Effect of integrated use of farmyard manure and sulphur in a soybean and wheat cropping system on nodulation, dry matter production and chlorophyll content of soybean on swell-shrink soils in Central India. *J. Agronomy & Crop Science* 185: 91-97.
- García, F.O; Darwich, N. 2009. La fertilización: tecnología para sostener la producción de nuestro suelos. En: La Argentina 2050. La Revolución Tecnológica del Agro. Ricci, D. (Editora). 744 p.
- García, F.O., Salvagiotti, F. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. En: Actas del XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 16 al 20 de noviembre de 2009. Simposio "Eficiencia de la Utilización de Nutrientes en Sistemas Agrícolas". 18p.
- García, F.O., Boxler, M., Minteguiaga, J., Pozzi, R., Firpo, L., Deza Marín, G., Berardo, A. 2006. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005. AACREA. Primera edición.
- García, F., Melgar, R. 2001. Soja: respuesta a la fertilización en la Región Pampeana. Resultados campaña 2000-01 de la Red de Ensayos del proyecto Fertilizar del INTA. 31 p.
- Germida, J.J., Janzen, H.H. 1993. Factors affecting the oxidation of elemental sulphur in soils. *Fertilizer Research* 35: 101-114.
- Girma, K., Mosali, J., Freeman, K.W., Raun, W.R. 2005. Forage and Grain Yield Response to Applied Sulfur in Winter Wheat as Influenced by Source and Rate. 28:1541-1553.
- Gutiérrez Boem; F.H., Prystupa, P., Ferraris, G. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104, 2007.

- Gutiérrez Boem, F. H. 2006. Azufre. En: *Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados*. R. Alvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 p.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2007. Sulfur interactions in crop ecosystems. Chapter 2. In: *Sulfur in Plants. An Ecological Perspective*. M.J. Hawkesford and L.J. de Kok (editors). Springer 17-58 p
- Horowitz, N., Meurer, E.J. 2007. Relationship between soil attributes and elemental sulfur oxidation in 42 soil samples from Brazil. *R.Brasi.Ci.Solo*, 31: 455-463.
- Lisle, L., Lefroy, R., Anderson, G., Blair, G. 1994. Methods for the measurement of sulphur in plant and soils. *Sulphur in Agriculture*. V 18. 45-54 p.
- Martinez, F., Cordone, G. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en soja. *Para mejorar la Producción* 8:53-57.
- Mc Caskill, M. R., Blair, G. 1989. A model for the release of sulfur from elemental S and superphosphate. *Fertilizer Research* 19: 77-84.
- Melgar R.J.; Torres Duggan, M. 2005. Comercio y abastecimiento moderno de fertilizantes. Editorial Hemisferio Sur-INTA. 196 p.
- Murphy, G. M., Hurtado, R.H., Fernandez Long, M.E., Serio L.A., Faroni, P.A., Maio, S., Spescha, L.B., Barnatán, I.E. 2008. *Atlas Agroclimático de la Argentina*. Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 130 p
- Murphy, J.; Riley, H.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-36.
- Nelson, D.W., Sommers, E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., (ed). *Methods of Soil Analysis, Part 2. Second edition*. Agronomy 9: 534-579
- Pagani A., Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*. 27: 21-31.
- Peech, M. 1965. Method for soil pH in water. Hydrogen-ion activity. En: *Method of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Black, CA. 915-926.
- Pilatti, MA; S Imhoff; P Ghiberto & RP Marano. 2005. Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma* 133: 431-443.
- Prochnow L.; Blair, G. 2010. Sulphur status of soils of the Cerrado region of Brazil and the ability of important agricultural soils of Brazil to oxidize elemental S. 19th World Congress of Soil Science. Brisbane, Australia. 2010. Actas en DVD.

- Reussi Calvo, N., I.; Echevería, H.E.; Saiz Rozas, H. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 24 (1) 0-0.
- Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigalupo, S., Castellarín, J., Galarza, C., González, N., Gudelj, V., Novello, O., Pedrol, H., Vallone, P. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 22 (2) 92-101 p.
- Schoneau, J.L.; Malhi, S.S. 2008. Sulfur form and cycling processes in soil and their relationship to sulfur fertility. Chapter 1. In: *Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition*. Joseph Jez (Editor). Agronomy Monograph N°50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Stipp, S.R.; Casarin, V. 2010. Informacoes Agronomicas N° 129. IPNI Brasil. 14-20 p.
- Tabatabai, M.A., 2005. Chemistry of sulfur in soils. In: *Chemical Processes in Soils*. M.A Tabatabai and D.L Sparks (Co-editors). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Til A.R. 2010. Sulphur sources. Chapter 10. In: *Sulphur and Sustainable Agriculture*. First edition. IFA, Paris, France. 70 pp.
- Tisdale, S.L., Nelson, W.L., Beaton, J.D., Havlin, J.L. 1993. Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. In: *Soil Fertility and Fertilizers*. Fifth edition. Macmillan Publishing Company. 634 p.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. En: A.L. Page *et al.* Eds). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. Agron.9. ASA and SSSA. Madison. Wisconsin. 1559-165 p.
- Torres Duggan M.; Rodríguez, M.B. 2009. Buenas prácticas de manejo de Fertilizantes azufrados: propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. En: *Simposio de Fertilidad 2009*. IPNI Cono Sur. García F.O. e I.A. Ciampitti (eds). 224-233 p.
- Torres Duggan M, Gambaudo, S; Quaino, O. 2006. Evaluación de fuentes azufradas en un Argiudol típico de la provincia de Santa Fe Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 18-22 de Septiembre de 2006. Salta-Jujuy. Actas en CD.
- Tysko M. B., Rodríguez, M. 2006. Respuesta de trigo-soja en el doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Ciencia del Suelo* (Argentina) 24 (2): 139-146,

CAPÍTULO 4

INFLUENCIA DE LAS FUENTES AZUFRADAS EN LA RESIDUALIDAD DE LA FERTILIZACIÓN.

4.1.-INTRODUCCIÓN

El doble cultivo trigo/soja de 2da representa una secuencia muy importante de la rotaciones de la Región Pampeana (FAO, 2004; Lavado & Taboada, 2009). Actualmente, las rotaciones trigo/soja 2da-maíz (tres cultivos en dos años) o la rotación trigo/soja 2da-maíz-soja de 1ra (cuatro cultivos en tres años) son muy frecuentes en esta región, fundamentalmente en el centro-norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe.

Estas rotaciones son comúnmente fertilizadas con N, P y S. Se han detectado efectos residuales de la fertilización con P y S en el trigo sobre la soja de segunda en experimentos de campo efectuados en los últimos años (Cordone & Martinez, 2001; Salvagiotti *et al.* 2004; García & Echeverría, 2008). El conocimiento de la residualidad de la fertilización en secuencias de cultivos resulta una herramienta fundamental para el manejo de la tecnología de la fertilización. La posibilidad de aplicar los nutrientes necesarios para el doble cultivo en el trigo, representa una ventaja operativa importante. Por un lado, se evita el costo de la aplicación de los fertilizantes en la soja de 2da y por otro lado, se mejora la eficiencia de siembra de la soja de 2da, permitiendo adelantar las fechas de siembra, con mayor rendimiento potencial.

Los efectos residuales de la fertilización en las rotaciones de cultivos se ven condicionados por la forma química (S^0 vs. $S-SO_4^{2-}$) de los fertilizantes azufrados y su solubilidad en agua (Till, 2010). Así, las fuentes solubles sulfatadas presentan como ventaja la inmediata disponibilidad del S aplicado, pero tienen mayor riesgo de pérdidas por lixiviación de SO_4^{2-} . En cambio, como se sabe, el AE (insoluble en agua) debe oxidarse en el suelo para producir SO_4^{2-} disponibles para las plantas. Por ello, el AE es considerado como una fuente azufrada con mayor capacidad de generar efectos residuales en las rotaciones de cultivos (Tabatabai, 2005; Horowitz, 2007; Franzen *et al.* 2008). En este sentido, experimentos en maceta utilizando ^{35}S en maíz conducidos por Friesen (1989) reportaron una mayor absorción de S en el cultivo cuando se aplicó SSP (superfosfato simple de calcio) en relación al AE, pero se observó mayor residualidad con esta última fuente azufrada. Las menores pérdidas de S cuando se aplica AE resulta una ventaja interesante en rotaciones ubicadas en regiones húmedas y subhúmedas, cuando se presentan factores predisponentes al lavado.

El tiempo en el cual el AE libera SO_4^{2-} depende de distintos factores, pero la granulometría y las condiciones ambientales como temperatura y humedad, son las principales variables que se consideran cuando se evalúa la aptitud agronómica de estas fuentes para ser utilizada en programas de fertilización en determinadas regiones o ambientes edafo-climáticos (Boswell & Friesen, 1993). Sin embargo, la influencia de otros factores locales sobre la oxidación del AE (e.g. organismos presentes en el suelo; antecedentes de fertilización azufrada; sistemas de labranza, etc.) limita la extrapolación de resultados basados únicamente en variables edáficas o ambientales. Por ello, la experimentación local resulta un paso fundamental para determinar la eficiencia agronómica del AE en los agro-ecosistemas de la Región Pampeana.

En la Argentina, la mayoría de los estudios de residualidad utilizaron fuentes sulfatadas solubles (Díaz Zorita *et al.*, 2002, Salvagiotti *et al.*, 2004, Gutiérrez Boem *et al.*, 2007, García *et al.*, 2006), siendo muy limitada la información experimental

proveniente de experimentos donde se haya considerado en forma simultánea la performance de fuentes solubles e insolubles, en gradientes ambientales (e.g. diferentes ciclos de cultivos, condiciones climáticas, etc.).

4.2.-INTERROGANTES

Este capítulo se desarrollará en base al siguiente interrogante:

¿La residualidad de la fertilización azufrada en trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda, se encuentra condicionada por la solubilidad y forma química de la fuente azufrada?

4.3.-OBJETIVO

Evaluar las diferencias entre fuentes azufradas en la residualidad de la fertilización azufrada realizada en trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda.

4.4.- HIPÓTESIS

La residualidad de la fertilización del trigo sobre el rendimiento de la soja de 2da, es mayor con el AE micronizado que con SA.

4.5.-MATERIALES Y MÉTODOS ESPECÍFICOS

4.5.1.-Características de sitios experimentales

La descripción de los sitios y experimentos se describen en el capítulo 3 de esta tesis, ya que los ensayos en soja de segunda se establecieron en las mismas parcelas que los experimentos de trigo, una vez cosechado éste último cultivo. Las características productivas, fisiográficas, edáficas y climáticas del área de estudio fueron descriptas en el capítulo 2 de esta tesis. En la Tabla 4.1 se muestran las fechas de siembra y los genotipos de soja utilizados en cada sitio y año de experimentos.

Tabla 4.1. Fechas de siembra y genotipos de soja utilizados en los experimentos.

Año 1		
Sitio	Genotipo	Fecha de siembra
Urquiza	A 6001	8/12
Arequito	A 6001	16/12
Bolívar	DM 47	15/12
Alberti	DM 43	21/12
Pergamino	DM 43	20/12
Año 2		
Alberti	A 4956	18/12
Arequito	Nidera 6401	18/12
Bragado	Tijer. 2045	29/01

En el capítulo 2 (Materiales y métodos generales) se detallan las características agro-ecológicas del área de estudio y localización geográfica de cada sitio experimental (latitud y longitud).

4.5.2.- Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental fue similar al aplicado en los ensayos de trigo (capítulo 3), es decir se utilizó un diseño en bloques completos al azar (DBCA) con seis repeticiones en el primer año y cuatro repeticiones en el segundo año. Se aplicó un arreglo factorial de tratamientos. El factor 1 correspondió al tipo de fuente y el factor 2, a la dosis de S. En el capítulo 3 se presentaron los detalles de las fuentes azufradas aplicadas, dosis y formas de aplicación de los mismos.

4.5.3-Análisis estadístico

Los efectos de tratamientos se evaluaron por Análisis de la Variancia (ANVA) factorial. Para las comparaciones de medias de tratamientos se utilizó LSD Fisher. Los efectos de fuente se calcularon a través de contrastes ortogonales. En los sitios donde la interacción fuente x dosis fue significativa ($p < 0,05$) los contrastes se realizaron para cada nivel de dosis. Cuando la interacción fuente x dosis no fue significativa, se promediaron las dosis de cada fuente.

La asociación entre las respuestas y las variables edafo-climáticas se realizó a partir del análisis de correlación (coeficientes de Pearson) y análisis de regresión lineal simple. Se utilizó el programa Info Stat (Profesional, versión 1.1) y para los análisis estadísticos en gráficos se utilizó el programa Prism[®] (Graph Pad versión 4.0).

4.5.4.- Muestreos y determinaciones en suelo y planta

Luego de la cosecha del trigo, se realizó un muestreo compuesto de suelos en las parcelas testigo (sin agregado de S) y se determinaron los contenidos de $S-SO_4^{2-}$ (0-20 cm), que se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Contenido de $S-SO_4^{2-}$ (mg kg⁻¹ 0-20 cm) al inicio del cultivo de soja de segunda en parcelas testigo.

Año 1	
Sitio	Contenido $S-SO_4^{2-}$
Urquiza	9
Arequito	7
Bolívar	6
Alberti	6,4
Pergamino	4,1
Año 2	
Alberti	5,2
Arequito	7,3
Bragado	4,6

La determinación de $S-SO_4^{2-}$ se realizó en el laboratorio de la EEA INTA Pergamino, utilizando como extractante KH_2PO_4 1M, con relación suelo-solución de 1:5 luego de una hora de agitación. El S se determinó por turbidimetría utilizando carbón activado y cuantificación espectrofotométrica a una longitud de onda de 450 nm (Lisle

et al. 1994). A partir del contenido de $S-SO_4^{2-}$ medido en las parcelas que no recibieron S (testigo) antes de la siembra de la soja de 2da, se estimó la mineralización aparente del suelo durante el ciclo de trigo, aplicando la siguiente ecuación:

$$S \text{ min (kg/ha)} = S \text{ final} - S \text{ inicial} + S \text{ abs. cultivo} \quad (1)$$

Donde,

S final = kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$ (0-20 cm) medido en post-cosecha de trigo

S inicial = kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$ (0-20 cm) medido en pre-siembra del trigo.

S abs. cultivo = kg ha⁻¹ de S absorbido para el rendimiento medido en parcelas testigo. Requerimiento y absorción estimado en base a Ciampitti *et al.* (2007).

El valor de mineralización de cada sitio se utilizó para estimar el S aparente remanente al final del ciclo del trigo en los diferentes tratamientos fertilizados y sitios, como una forma de estimar la biodisponibilidad del S al final del ciclo de trigo, que no fue medido en las parcelas fertilizadas. Para estimar el S remanente aparente se utilizó la siguiente ecuación:

$$S \text{ rem. (kg/ha)} = S \text{ inicial} + S \text{ min} + S \text{ aplicado} - S \text{ abs. cultivo} \quad (2)$$

Donde,

S inicial = kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$ (0-20 cm) medido en pre-siembra del trigo.

S min = S mineralizado estimado según ecuación 1.

S abs. cultivo = kg ha⁻¹ de S absorbido para el rendimiento medido en parcelas testigo. Requerimiento y absorción estimado en base a Ciampitti *et al.* (2007).

Las ecuaciones 1 y 2 se basan en el supuesto de que no hay lixiviación por debajo de 20 cm de profundidad y los aportes atmosféricos de S durante el ciclo de trigo, fueron despreciables agronómicamente.

En madurez fisiológica se determinó la biomasa de grano. La cosecha se realizó en forma manual sobre una superficie de 2 m² por parcela. Las plantas fueron secadas en estufa a 60°C hasta alcanzar peso constante y posteriormente trilladas con máquina experimental estacionaria provista por la EEA INTA Pergamino. La biomasa de grano se expresó en Mg ha⁻¹ en humedad comercial (130 g kg⁻¹).

4.5.5.- Registro de información climática

La información de temperaturas y precipitaciones para los diferentes sitios experimentales fue provista por estaciones experimentales y agencias de extensión de INTA. Las series históricas de precipitación y temperatura en el área de estudio fueron obtenidas del Atlas Agroclimático de la Argentina (Murphy *et al.* 2008).

4.6.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.6.1.-Características climáticas de los años evaluados

La precipitación media del primer año de experimentos durante el ciclo del cultivo (enero-abril) fue 447 mm. En promedio, el conjunto de ensayos del primer año fue levemente inferior (2%) al promedio histórico del área de estudio (Figura 4.1)

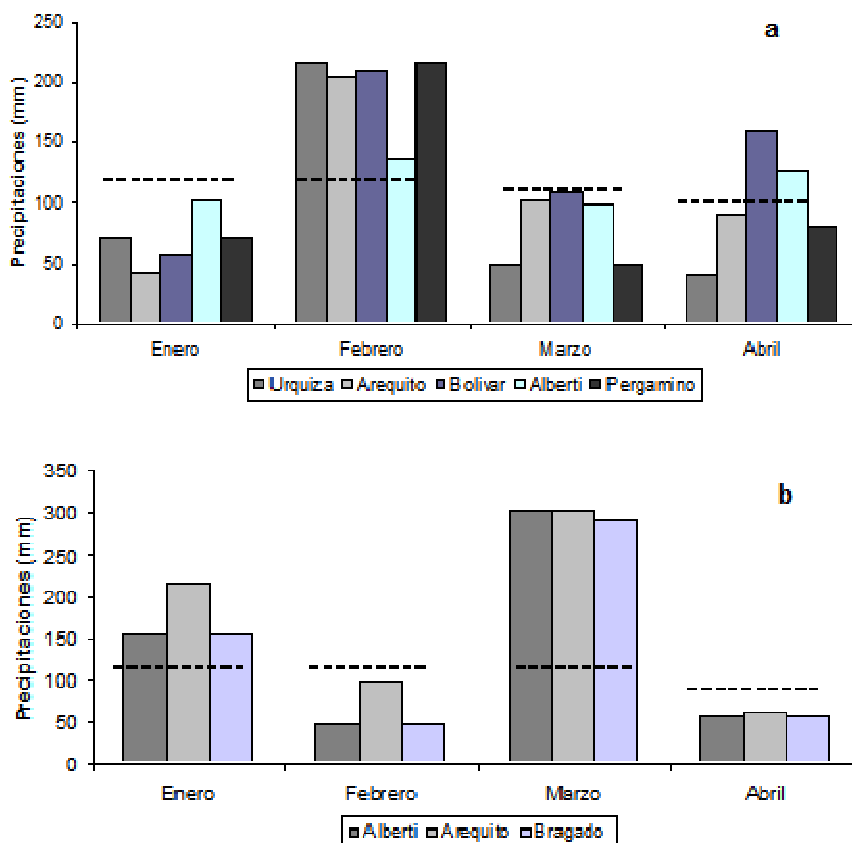


Figura 4.1. Precipitación media mensual durante el ciclo del cultivo en cada sitio experimental. a: año 1 (n=5). b: año 2 (n=3). La línea punteada indica la precipitación media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

La pluviometría de cada sitio en relación al promedio regional, expresado en términos porcentuales fue: -19; -2,2, +16, + 3,4 y -7,9% para Urquiza, Arequito, Bolívar, Alberti y Pergamino, respectivamente. Urquiza fue el único sitio donde se observó una limitación hídrica importante con mermas en el rendimiento. En el segundo año de ensayos, las precipitaciones del conjunto de experimentos superaron a la media regional en un 23%. Asimismo, todos los sitios presentaron lluvias superiores al promedio histórico regional: +20, +33 y +18% en Alberti, Arequito y Bragado, respectivamente.

La temperatura media mensual de los dos años de experimentos fue similar a los registros climáticos históricos en el área de estudio (Murphy *et al.*, 2008) (Figura 4.2)

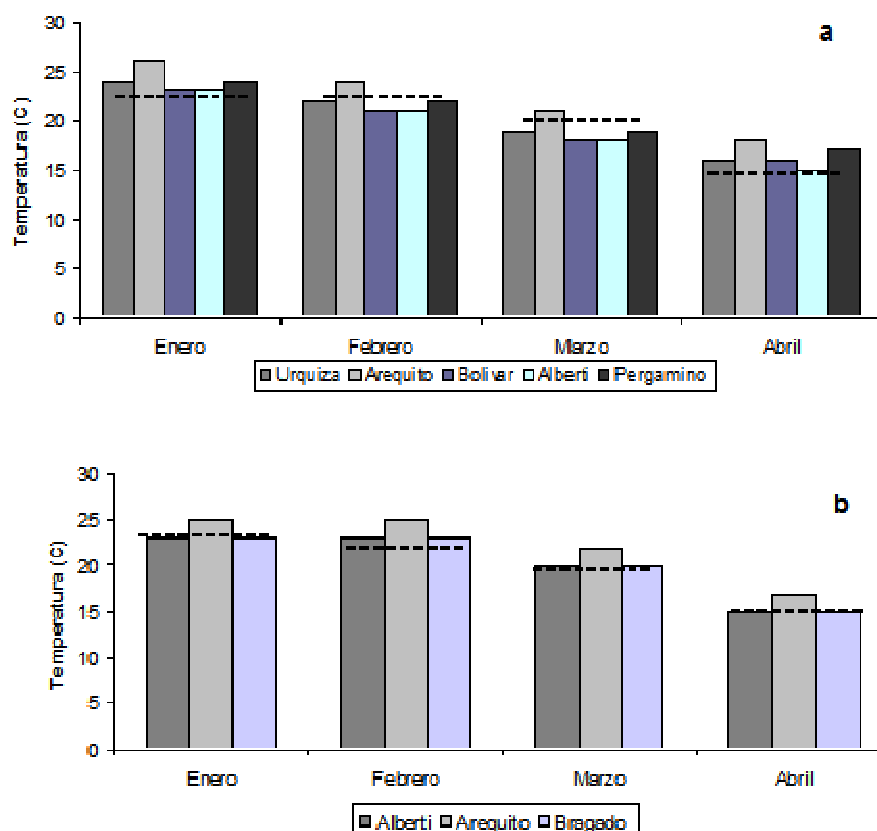


Figura 4.2. Temperatura media mensual durante el ciclo del cultivo en cada sitio experimental para los dos años de experimentos. a: año 1 (n=5). b: año 2 (n=3). Las líneas punteadas indican la temperatura media histórica del período 1971-2000 para la región de estudio.

4.6.2. Rendimientos y residualidad de la fertilización azufrada

En el primer año de experimentos la residualidad de la fertilización realizada en trigo evaluada en la soja de segunda fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en un solo sitio experimental (Pergamino) y en otro sitio (Arquito) se observó una tendencia ($p = 0,14$, Tabla 4.3). Durante el segundo año de experimentos, en Bragado la respuesta fue estadísticamente significativa al 5%.

Tabla 4.3. Rendimientos medios de soja de 2° (kg ha⁻¹) de tratamientos sin agregado de S (testigo) y fertilizados con S (año 1, n=5; año 2, n=3).

Sitio	Testigo	Fertilizado	Respuesta	Valor p
Año 1				
Urquiza	1787	1845	58	0,42
Arequito	3552	3724	172	0,14
Bolívar	2171	2193	22	0,62
Alberti	1975	1995	20	0,83
Pergamino	1416	2105	689	<0,001
Año 2				
Alberti	2473	2659	186	0,57
Arequito	2991	3311	320	0,14
Bragado	2987	3944	512	0,05

El rendimiento medio del primer año fue de 2276 kg ha⁻¹ (mínimo 1816 kg ha⁻¹, máximo 3638 kg ha⁻¹) y en el segundo año 2986 kg ha⁻¹ (mínimo 2566 kg ha⁻¹, máximo

3243 kg ha⁻¹). Las respuestas medias observadas resultaron inferiores a las reportadas por otros autores en la zona de estudio (FAO, 2004; Díaz Zorita *et al.* 2002; Gutiérrez Boem *et al.* 2007).

4.6.3. Relación entre las respuestas y variables edafo-climáticas

Las respuestas a la fertilización azufrada no se relacionaron con las variables climáticas evaluadas (precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo o con la temperatura)(Tabla 4.4). En el caso de la temperatura, el rango explorado fue demasiado estrecho como para detectar diferencias.

Tabla 4.4.- Coeficientes de correlación de Pearson (r) y significación estadística (valor p) entre las respuestas (kg ha⁻¹) al agregado de S y variables edafo-climáticas integrando los dos años de experimentos.

Variable	Coeficiente correlación (r)	Significación estadística (valor p).
S remanente (estimado)	0,58	0,13
Precipitaciones	0,09	0,83
Temperatura	0,27	0,52

Se observó una relación inversa entre las respuestas y el contenido de S remanente (estimado al inicio del cultivo), a nivel de tendencia (p=0,13) debido al estrecho rango de S explorado. Esta relación fue similar entre fuentes, sin diferencias estadísticas en pendientes de la regresión (p=0,44) ni en los interceptos (p=0,86). Por lo tanto, se integraron las fuentes y dosis en una sola recta de regresión (Figura 4.3).

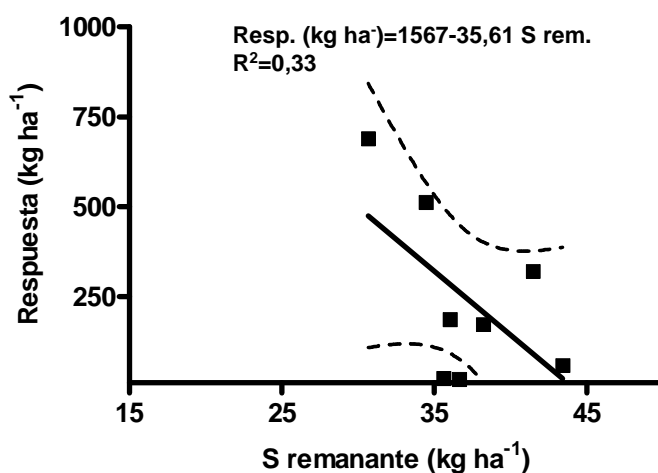


Figura 4.3. Relación entre las respuestas al agregado de S (media de dosis y fuentes) y el contenido de S remanente al inicio de la soja de 2da. (0-20 cm). Las líneas puntadas indican el intervalo de confianza del 95%.

4.6.4.Efectos de tratamiento, fuente y dosis.

La fertilización presentó una baja frecuencia de casos con efecto global de tratamiento. En la Tabla 4.5 se presentan los promedios de cada tratamiento, el valor de LSD y el valor p del ANVA global (efecto de tratamiento).

Tabla 4.5. Rendimiento en grano de soja de segunda (kg ha⁻¹) para los diferentes tratamientos de fertilización (año 1, n=5; año 2, n=3).

Año 1							
Sitio	Testigo	SA ₁	SA ₂	AE ₁	AE ₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
Urquiza	1787	1796	1866	1749	1970	-	0,18
Arequito	3552	3661	3616	3701	3918	-	0,14
Bolívar	2171	2201	2185	2130	2255	-	0,28
Alberti	1975	1839	1873	2022	2245	255	0,027
Pergamino	1416	2415	2337	1432	2237	391	<0,001
Media	2180	2382	2375	2206	2525		
Máximo	3552	3661	3616	3701	3918		
Mínimo	1416	1796	1866	1432	1970		

Año 2							
Sitio	Testigo	SA ₁	SA ₂	AE ₁	AE ₂	LSD ($\alpha=0,05$)	p ANVA
Alberti	2473	2521	2833	2832	2641	-	0,92
Arequito	2991	2991	3121	3642	3196	-	0,19
Bragado	2987	2849	4070	3171	3907	663	0,004
Media	2817	2787	3341	3215	3248		
Máximo	2991	2991	4070	3642	3907		
Mínimo	2473	2521	2833	2833	2641		

SA1: Sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA2: Sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE1: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE2: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

En Alberti se observó efecto significativo de fuente, sin efecto de dosis o interacción fuente x dosis. La respuesta con AE fue mayor que con SA. En Pergamino la interacción fuente x dosis se observó a través de una mayor respuesta con SA en relación al AE con la dosis baja (10 kg ha⁻¹ de S) y una residualidad similar entre fuentes con la dosis mas alta de S aplicada (30 kg ha⁻¹ de S) (Tabla 4.8). Las causas de estas diferencias resultan difíciles de establecer ya que en el trigo antecesor se observó el efecto opuesto. Para poder determinar las causas, se debería disponer de mas mediciones (e.g. evolución del contenido de S en el suelo durante los cultivos; absorción de S por los cultivos, monitoreo hídrico edáfico, etc.), que no fueron definidas, para el objetivo de la tesis.

Tabla 4.6. Análisis de variancia para los factores Fuente, Dosis y Fuente x Dosis, en sitios con efecto de tratamiento ($p < 0,05$). Primer año de ensayos.

Alberti			
FV	G L	F	Valor p
Fuente	1	8,82	0,0076
Dosis	1	1,32	0,26
Fuente x Dosis	1	1,24	0,27

Pergamino			
FV	G L	F	Valor p
Fuente	1	13,44	0,0015
Dosis	1	5,66	0,027
Fuente x Dosis	1	8,41	0,008

En el único sitio experimental donde se observó efecto significativo de tratamiento durante el segundo año de experimentos fue Bragado (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Análisis de variancia para los factores Fuente, Dosis y Fuente x Dosis, en sitios con efecto significativo de tratamiento ($p < 0,05$). Segundo año de experimentos.

Bragado			
FV	G L	F	Valor p
Fuente	1	0,11	0,74
Dosis	1	16,5	0,0016
Fuente x Dosis	1	1,01	0,33

La respuesta media fue similar entre las fuentes azufradas y el nivel de dosis aplicada de S determinó incrementos estadísticamente significativos en el rendimiento ($p < 0,05$). La dosis mas alta (30 kg ha^{-1} de S) provocó aumentos de casi 1000 kg ha^{-1} en el rendimiento en relación a la dosis más baja (15 kg ha^{-1} de S)(Tabla 4.5).

Tabla 4.8. Contrastes ortogonales (SA-AE) para los diferentes sitios experimentales.

Año 1		
Sitio	Contrastekg ha⁻¹.....	Valor p
Urquiza	-29	0,64
Arequito	-171	0,10
Bolívar	1	0,98
Alberti	-278	0,004
Pergamino	983 (SA ₁ vs AE ₁)	<0,001
	100 (SA ₂ vs AE ₂)	0,54
Año 2		
Alberti	36	0,66
Arequito	142	0,45
Bragado	-80	0,71

SA₁: sulfato de amonio con primer nivel de dosis de S. SA₂: sulfato de amonio con segundo nivel de dosis de S. AE₁: azufre elemental con primer nivel de dosis de S. AE₂: azufre elemental con segundo nivel de dosis de S.

Resultados similares fueron reportados por Agrawal & Mishra (1994) en suelos con bajos contenidos de MO en el mismo cultivo. Los autores detectaron incrementos del 28,6% en biomasa de grano sobre el testigo aplicando 20 kg ha⁻¹ de S en forma de SA y AE. Con dosis superiores (30 o 40 kg ha⁻¹ de S), las respuestas se estabilizaron, definiendo como dosis mas eficiente la de 20 kg ha⁻¹ de S.

La ausencia de efectos residuales significativos en soja de segunda en los sitios Urquiza, Arequito y Bolívar (primer año de experimentos) y en Alberti y Arequito (segundo año de experimentos) podrían atribuirse a una elevada disponibilidad de S en el suelo al inicio del cultivo. Las estimaciones de S remanente aparente fueron altas en todos los sitios experimentales (Tablas 4.9 y 4.10).

Tabla 4.9. Componentes del balance de S y estimación del S remanente aparente al final del ciclo de trigo. Primer año de ensayos (n=5).

Sitio	Tratamiento	S abs.	Si	S fert.	S disp.	S min	S REM
Urquiza	0 S	5	18	0	18	11	23
	10 S	7	18	10	28	11	31
	30 S	6	18	30	48	11	53
Arequito	0 S	5	19	0	19	4	18
	10 S	6	19	10	29	4	27
	30 S	6	19	30	49	4	48
Bolívar	0 S	5	12	0	12	9	16
	10 S	6	12	10	22	9	25
	30 S	6	12	30	42	9	44
Alberti	0 S	6	16	0	16	4	13
	10 S	7	16	10	26	4	23
	30 S	7	16	30	46	4	43
Pergamino	0 S	6	10	0	10	7	11
	10 S	8	10	10	20	7	19
	30 S	7	10	30	40	7	40

S abs: azufre absorbido por cultivo. Si: azufre inicial (0-20 cm). S fert: azufre aplicado como fertilizante. S min: azufre mineralizado (estimado). S REM: azufre remanente al final del ciclo del trigo (0-20 cm).

Tabla 4.10. Componente del balance de S y estimación del S remanente aparente al final del ciclo de trigo. Segundo año de ensayos (n=3).

Sitio	Tratamiento	S abs.	Si	S fert.	S disp.	S min	S REM
Alberti	0 S	5	9	0	9	10	13
	15 S	7	9	15	24	19	36
	30 S	7	9	30	39	19	51
Arequito	0 S	4	11	0	28	-5	19
	15 S	5	11	15	43	-5	33
	30 S	6	11	30	58	-5	47
Bragado	0 S	3	6	0	6	9	12
	15 S	6	6	15	21	9	24
	30 S	6	6	30	36	9	39

S abs: azufre absorbido por cultivo. Si: azufre inicial (0.20 cm). S fert: azufre aplicado como fertilizante. S min: azufre mineralizado (estimado). S REM: azufre remanente al final del ciclo del trigo (0-20 cm).

Resultados similares a los observados en esta tesis fueron reportados por Tysko & Rodríguez (2006) en cinco experimentos conducidos en la misma región agro-climática, utilizando también una fuente de AE con baja granulometría, considerada reactiva en el suelo.

Teniendo en cuenta una extracción media de S de 2,8 kg de S por tonelada de grano de rendimiento como base de estimación de la absorción de S (Ciampitti *et al.*, 2007), los valores estimados de S remanentes del trigo (i.e. el contenido de S inicial para la soja de 2da), son altos y podrían ser un indicador de la baja frecuencia de sitios con efectos residuales detectado en la soja de segunda. Si bien los valores son elevados en todos los sitios, en aquellos donde se observaron efectos residuales significativos ($p < 0,05$), se registró el menor contenido medio de S remanente en los tratamientos fertilizados. Las condiciones climáticas durante el ciclo de la soja de segunda, coincidentes con el período estival, favorecen la mineralización de S de la MO del suelo, fundamentalmente a través de la mayor temperatura y disponibilidad hídrica (Tabatabai, 2005; Heneklaus *et al.* 2007). Por lo tanto, una explicación de la baja frecuencia de sitios con residualidad, podría ser una elevada disponibilidad de S al inicio del cultivo y/o altos aportes de S por mineralización desde fracciones orgánicas edáficas, que habrían cubierto la demanda de S para los rendimientos obtenidos.

Resultados similares a los observados en el presente estudio en los sitios con residualidad, fueron reportados por otros autores en la misma región agro-climática (Cordone & Martinez, 2001; Díaz Zorita *et al.* 2002, Cordone *et al.* 2002; García & Echeverría, 2008).

4.6.5. Eficiencia agronómica de fuentes azufradas

En las Tablas 4.11 y 4.12 se presenta la eficiencia agronómica de fertilización azufrada ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) para las dos fuentes azufradas y dosis aplicadas. Se realizó el análisis para cada año por separado, ya que el efecto de año fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$).

Tabla 4.11. Eficiencia de fertilización (kg de grano kg S aplicado⁻¹) en experimentos en soja de segunda (primer año). Comparación de medias por prueba de T bilateral.

	15 kg S ha ⁻¹		30 S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	20	3	7	9
EE	20,3	3,4	6,1	11
N	5	5	5	5
Valor "p" (SA vs. AE)	0,44		0,001	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar. N: cantidad de datos (sitios).

Tabla 4.12. Eficiencia de fertilización (kg de grano kg S aplicado⁻¹) en experimentos en soja de segunda (segundo año). Comparación de medias por prueba de T, bilateral.

	15 kg S ha ⁻¹		30 S ha ⁻¹	
	SA	AE	SA	AE
Media	0,8	12	23	109
EE	5,2	0,7	7	12
N	3	3	3	3
Valor "p" (SA vs AE)	0,15		0,003	

SA: sulfato de amonio. AE: azufre elemental. EE: error estándar. N: cantidad de datos (sitios).

Para la dosis mas baja de aplicación de S, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en eficiencia agronómica de uso de S entre fuentes azufradas. Las diferencias se detectaron con el nivel de dosis más alta (30 kg ha⁻¹ de S). Asimismo, durante el segundo año se observó una mayor eficiencia de uso del S aplicado, independientemente del fertilizante azufrado. Posiblemente, las mayores precipitaciones habrían generado condiciones más favorables para el logro de altos rendimientos, con aumentos en la demanda de S, que fueron cubiertas con la aplicación de la dosis más alta de S en el trigo. Para la misma región agro-ecológica, Ferraris (2008) indicó eficiencias de fertilización de 20-25 kg de grano kg de S aplicado⁻¹. La elevada variabilidad entre sitios durante el primer año en los tratamientos donde se aplicó la dosis mas baja (10 kg ha⁻¹ de S), impidió detectar diferencias estadísticamente significativas en eficiencia agronómica entre las fuentes azufradas. En el segundo año, con la menor dosis de aplicación (15 kg ha⁻¹ de S) se observó una tendencia, aunque poco robusta ($p = 0,15$), con mayor eficiencia en los tratamientos con aplicación de AE.

Considerando el nivel de dosis donde se observaron efectos significativos de la fuente azufrada (dosis de 30 kg ha⁻¹ de S), para los dos años de experimentación, la eficiencia fue mayor con AE que con SA. Sin embargo, la mayor eficiencia agronómica de S alcanzada y la mayor eficiencia relativa al SA se obtuvieron en el segundo año de experimentos (Tabla 4.12).

Los valores de eficiencia agronómica del S observados en los experimentos de la tesis son similares a las reportadas por Gutiérrez Boem *et al.* (2007) en cuatro ensayos conducidos en soja de primera durante tres años consecutivos en la Región Pampeana (entre 10,5 y 31,7 kg de grano kg de S aplicado⁻¹), aunque con valores mínimos más extremos. La mayor respuesta con AE se pudo deber a la menor lixiviación de SO₄²⁻ comparado con la fuente sulfatada soluble. En Alberti (primer año de experimentos), donde la eficiencia fue significativamente mayor ($p < 0,05$) con AE, se presentaron

precipitaciones intensas y elevadas (aprox. 100 mm) durante el mes de enero, no registradas en el resto de los sitios. La soja se sembró a fines de diciembre, por lo cual, en enero el cultivo presentó baja cobertura incrementando el riesgo de lixiviación de SO_4^{2-} . Por ello, una hipótesis explicativa de la menor respuesta con el SA pudo haber sido una mayor pérdida por lixiviación (no medido en los experimentos).

En igual sentido, Friesen (1991) observó mayor efecto residual con AE (polvo o granulado) en relación a yeso, con dosis de 5-10 kg ha⁻¹ de S (menores a las evaluadas en esta tesis). Las pérdidas con el yeso fueron del 50% del S aplicado y con el AE no superó el 20% del S agregado. A diferencia de lo observado en la presente tesis, donde la residualidad no fue consistente en todas las dosis, sitios y años evaluados, experimentos en invernáculo conducidos por Horowitz & Meurer (2005) en Brasil, reportan, de un modo consistente, mayores efectos residuales con SPT enriquecido con AE (fertilizante complejo) comparado con yeso, en cuatro cultivos consecutivos de maíz. Durante el primer año el yeso presentó mejor performance que SPT-AE (i.e. efecto directo de fertilización) pero luego, en los años subsiguientes las respuestas fueron mayores con el AE (i.e. mayor residualidad de fertilización). En igual sentido, Friesen (1989) observó mayor residualidad del AE comparado con fuentes azufradas solubles (SSP y yeso) en experimentos de maceta donde se cultivó maíz. También Wen *et al.* (2002) indicaron mayor residualidad con AE que yeso en experimentos de campo realizados con una rotación colza-cebada-arveja en condiciones de clima frío (suelos de pradera de Canadá), mientras que Horowitz & Meurer (2005) reportaron mayor residualidad con diferentes fuentes de AE en relación a fertilizantes solubles en experimentos conducidos durante cuatro años en suelos tropicales de Brazil.

4.7.Consideraciones finales

Los resultados obtenidos en el presente capítulo permiten extraer las siguientes conclusiones respecto a la hipótesis postulada:

La hipótesis planteada fue:

La residualidad de la fertilización del trigo sobre el rendimiento de la soja de 2da, es mayor con el AE micronizado que con SA.

La hipótesis se rechaza. Los resultados obtenidos no permitieron determinar un patrón claro de residualidad en los sitios experimentales. Sin embargo, cuando se analizaron en forma conjunta los experimentos (nivel de percepción regional), con la mayor dosis de aplicación de S (30 kg ha⁻¹ de S), la eficiencia agronómica del S aplicado en forma de AE fue significativamente mayor ($p < 0,05$) que con SA, en los dos años de experimentación. En cambio, con la dosis más baja de aplicación de S (10 kg ha⁻¹ de S), el AE resultó más eficiente que el SA a nivel de tendencia ($p = 0,15$) y sólo en el segundo año de experimentos.

4.8.BIBLIOGRAFIA

- Agrawal, H.P., Mishra, A.K. 1994. Sulphur nutrition of soybean. Commun. Soil. Sci. Plant Anal. 25 (9&10):1303-1312.
- Boswell, C.C., Friesen, D.K. 1993. Elemental sulfur fertilizers and their use on crops and pastures. Fertilizer Research. 35:127-149.

- Ciampitti, I., A., García. F.O. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I. Cereales, Oleaginosas e industriales. Archivo Agronómico N°11. En: Informaciones Agronómicas N°33. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) Cono Sur. 28 p.
- Cordone, G.; Martinez, F. 2001. Efecto de la aplicación de distintas dosis de nitrógeno y azufre sobre el rendimiento de del doble cultivo trigo-soja. Para mejorar la producción 18-SOJA-EEA Oliveros, INTA.
- Cordone, G; F Salvagiotti; F Martinez; H Pedrl; J Castellarin *et al.* 2002. Efecto residual del cultivar y fertilización del trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda en distintos ambientes el sur de Sta Fe. INTA Oliveros Pub.Misc Soja: 66-68.
- Díaz Zorita, M., García F., Melgar, R. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la Región Pampeana. Resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar-INTA. Campaña 2000/2001 y 2001/2002. 43 p.
- FAO, 2004. Fertilizer use by crop in Argentina. Land and Plant Nutrition Management Service-Land and Water Development Division. Rome. 45 p.
- Ferraris, G. 2008. Fertilización de la soja. En: Fertilización de cultivos y pasturas. 2da edición. Ricardo Melgar y Martín Díaz Zorita (coordinadores). Hemisferio Sur-INTA. 569 p.
- Franzen, D.; Grant, C.A. Sulfur response based on crop, source, and landscape position. 2008. Chapter 7. En: Sulfur: A missing link between Soils, Crops, and Nutrition. Joseph Jez (Editor). Agronomy Monograph N°50. ASA, CSSA, SSSA. 313 p.
- Friesen, D.K. 1991. Fate and efficiency of sulfur fertilizer applied to food crops in West Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems. Vol 2 (1): 35-44
- Friesen, D.K. 1989. Agronomic effectiveness of alternative fertilizers. IFDC's experience. ACIAR Proceedings N°29, G.J. Blair and R. Lefroy (eds). Pp 107-114.
- García, F.O.; Echeverría H. 2008. Fertilización del trigo. En: Fertilización de cultivos y pasturas. 2da edición. Ricardo Melgar y Martín Díaz Zorita (coordinadores). Hemisferio Sur- INTA. 569 p.
- García, F.O., Boxler, M., Minteguiaga, J., Pozzi, R., Firpo, L., Deza Marín, G., Berardo, A. 2006. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005.AACREA. Primera edición. ISBN 987-22576-7-1
- Gutiérrez Boem; F.H., Prystupa, P., Ferraris, G. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. Journal of Plant Nutrition, 30: 93-104, 2007.

- Horowitz, N.; Meurer, E.J. 2005. Uso de enxofre elemental como fertilizante. POTAFOS. Informaciones Agronómicas. N°112. Decembro. 4-7 p.
- Horowitz, N., Meurer, E.J. 2007. Relationship between soil attributes and elemental sulfur oxidation in 42 soil samples from Brazil. R.Bras.Ci.Solo, 31: 455-463.
- Lavado, S.R; Taboada, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agrosource. Journal of Soil and Water Conservation. Vol 64 (5): 150-153
- Lisle, L., Lefroy, R., Anderson, G., Blair, G. 1994. Methods for the measurement of sulphur in plant and soils. Sulphur in Agriculture. V 18. 45-54 p.
- Murphy, G. M., Hurtado, R.H., Fernandez Long, M.E., Serio L.A., Faroni, P.A., Maio, S., Spescha, L.B., Barnatán, I.E. 2008. Atlas Agroclimático de la Argentina. Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 130 p
- Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigalupo, S., Castellarín, J., Galarza, C., González, N., Gudelj, V., Novello, O., Pedrol, H., Vallone, P. 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. Ciencia del Suelo (Argentina). 22 (2) 92-101 p.
- Tabatabai, M.A., 2005. Chemistry of sulfur in soils. In: Chemical Processes in Soils. M.A Tabatabai and D.L Sparks (Co-editors). Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Til, A.R. 2010. Sulphur sources. Chapter 10. In: Sulphur and Sustainable Agriculture. First edition. IFA, Paris, France. 70 pp.
- Tysko M. B., Rodríguez, M. 2006. Respuesta de trigo-soja en el doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. Ciencia del Suelo (Argentina) 24 (2): 139-146.
- Wen, G.; Schoenau, J.J.; Mooleki, S.P.; Inanaga, S.; Yamamoto, T.; Hamamura, K.; An, P. Effectiveness of an elemental sulfur fertilizer in an oilseed-cereal-legume rotation on the Canadian prairies. 2003. J. Plant. Nutr.Soil Sci.(166): 54-60

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

El objetivo general de esta tesis fue evaluar la respuesta y eficiencia agronómica del S aplicado al suelo en diferentes formas químicas y solubilidad del fertilizante aplicado: azufre elemental (AE, 0-0-0+95% de S, insoluble en agua) y sulfato de amonio (SA, 21-0-0 + 24% de S, hidrosoluble). La influencia de estas fuentes azufradas se determinó en diferentes cultivos. Los efectos directos de la fertilización azufrada se evaluaron en trigo y soja de primera y los efectos residuales del S aplicado al trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda. La metodología aplicada permitió analizar los resultados a dos escalas de percepción: sitio y regional.

La información obtenida sobre la fertilización en trigo, permitió determinar respuestas a la fertilización en el 80% de los sitios evaluados durante el primer año de experimentos y en todos los sitios, durante el segundo año. Las respuestas fueron menores en el primer año (231-857 kg ha⁻¹) que en el segundo año (708-2119 kg ha⁻¹). Las mismas se correlacionaron positivamente con las precipitaciones durante el barbecho y ciclo del cultivo y con la calidad de sitio (i.e contenido de MO y CIC) y fueron independientes de las variaciones de la temperatura entre sitios. Se pudo establecer una asociación inversa entre las respuestas a la fertilización azufrada y la disponibilidad de S-SO₄²⁻ en el suelo (0-20 cm), aunque con un bajo ajuste (R^2 medio de fuentes=0,18). En la mayoría de los sitios, la respuesta a la fertilización azufrada fue similar entre fuentes azufradas y no se observaron efectos significativos de dosis ($p>0,05$). La menor dosis de S aplicada (10 o 15 kg ha⁻¹ de S, para el primer y segundo año, respectivamente) resultó suficiente para cubrir la demanda del cultivo. En algunos sitios, sin embargo, pudieron detectarse diferencias significativas ($<0,05$) entre fuentes en las respuestas vinculadas a la incidencia de factores locales como el contenido de MO o las precipitaciones.

En los experimentos conducidos en soja de primera, a diferencia de lo observado en el cultivo de trigo, el “efecto año” fue significativo y se obtuvo una baja frecuencia de sitios con respuesta a la fertilización (25% en el primer año y 40% en el segundo). Las respuestas fueron de 377-982 kg ha⁻¹ (año 1) y de 151-361 kg ha⁻¹ (año 2). La menor frecuencia de sitios con respuesta y la menor magnitud de la misma en el primer año de experimentos se presentó en suelos con altos contenidos de MO (>25 g kg⁻¹). En el segundo año, los sitios evaluados presentaron menor dotación de MO (mínimo de 16 y un máximo de 19 g kg⁻¹ de MO). Por lo tanto, las frecuencias en respuesta a la fertilización azufrada entre años pudieron deberse a diferencias en la capacidad de mineralización del S entre ambos grupos de suelos. Durante el primer año de experimentos, las respuestas obtenidas no pudieron ser correlacionadas con las variables climáticas o edáficas medidas o estimadas. Durante el segundo año, las respuestas a la fertilización azufrada se correlacionaron en forma inversa con el contenido de S al inicio del cultivo ($R^2=0,63$). La eficiencia agronómica del S aplicado fue similar entre las fuentes azufradas durante el primer año pero se observó efecto significativo de dosis. La dosis más alta (30 kg ha⁻¹ de S) fue más eficiente en abastecer con S al cultivo. En el segundo año, dependiendo de la localidad, se observaron algunas diferencias en efectividad entre las fuentes asociadas con la influencia de variables de sitio (e.g. precipitaciones).

El análisis integral de los experimentos realizados en trigo y soja de primera a una escala regional (i.e. integrando los sitios) no permitió detectar diferencias en eficiencia agronómica ($\text{kg de grano kg de S aplicado}^{-1}$) entre el SA y el AE. Evidentemente, las diferencias ambientales entre los ciclos (fundamentalmente temperatura y precipitaciones) no determinaron distintas respuestas entre las fuentes azufradas, que fue lo propuesto en las hipótesis. Las implicancias de estos resultados son muy interesantes ya que indican que es posible impactar sobre la biomasa de grano aplicando el S en forma elemental (S^0) generando efectos directos en el trigo, tecnología novedosa y poco explorada hasta ahora en los agro-ecosistemas pampeanos. En general, los estudios disponibles en la Argentina evaluaron un solo tipo de forma química como fuente azufrada: S como SO_4^{2-} o S^0 . La evaluación conjunta en los mismos experimentos de ambas formas químicas, en diferentes dosis, permite efectuar comparaciones directas de la performance agronómica de los fertilizantes azufrados, importante para el manejo de la tecnología de la fertilización.

Desde el punto de vista agronómico, los resultados expuestos para los cultivos de trigo y soja de primera, indican, de un modo indirecto, que las condiciones ambientales exploradas en los experimentos no fueron limitantes de la oxidación del AE, ya que, a nivel regional, las eficiencias del SA fueron similares al AE, a pesar de que la primer fuente no requiere oxidarse para proveer SO_4^{2-} disponibles para las plantas y la segunda sí. En futuras investigaciones puede ser útil ampliar el gradiente ambiental explorado, sumando sitios con condiciones climáticas y edáficas más contrastantes.

En los experimentos conducidos en soja de segunda, al igual que lo observado en los ensayos de trigo, el “efecto año” no fue estadísticamente significativo ($p > 0,05$). Los efectos residuales de la fertilización azufrada en el trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda se presentaron en pocos sitios experimentales, en algunos casos solo a nivel de tendencia estadística. Las respuestas fueron de $58\text{-}689 \text{ kg ha}^{-1}$ y de $186\text{-}512 \text{ kg ha}^{-1}$ en el primer y segundo año, respectivamente y se pudieron relacionar en forma directa e inversa con el contenido de S estimado al inicio del cultivo ($R^2=0,33$). Esta relación no interactuó en forma estadísticamente significativa con el tipo de fuente ($p > 0,05$).

El análisis integral realizado con los sitios donde se observaron efectos residuales significativos indicó que, con la dosis mas baja de S (15 kg ha^{-1} de S) aplicada en el trigo, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre fuentes en la eficiencia agronómica. Por el contrario, con la dosis mas elevada (30 kg ha^{-1} de S) la eficiencia del AE fue mayor que la del SA, posiblemente debido a mayores pérdidas por lixiviación del SA, no cuantificadas en los experimentos. Estos resultados evidencian mayor complejidad de lo esperado al momento de plantear las hipótesis.

Los resultados observados permiten sugerir que es importante que las publicaciones donde se presentan resultados de fertilización con fuentes de AE consignen con mayor detalle las características químicas y físicas de las mismas. Esto permitirá comparar resultados experimentales de un modo mas adecuado, ya que las diferencias en propiedades físico-químicas del AE aplicado pueden generar diferencias importantes en la performance agronómica.

Los resultados obtenidos en los experimentos de esta tesis, evaluadas a diferente escala de percepción (sitio y regional), permitió aportar nuevo conocimiento sobre la

eficiencia de fuentes azufradas como el AE. Actualmente, en la Argentina, estos fertilizantes azufrados se están difundiendo tanto como fertilizantes simples, como componentes de mezclas físicas o productos complejos. Por ello, resulta relevante comenzar a disponer de modelos de recomendación específicos para estos fertilizantes en diferentes regiones de producción de la Región Pampeana.

Si bien son conocidos a nivel internacional los factores que regulan el proceso de oxidación del AE en el suelo (e.g. propiedades físicas del mineral, temperatura, humedad, organismos edáficos, etc.) la diferente interacción de los mismos, hace que no sea recomendable extrapolar resultados experimentales de otros ambientes edafo-climáticos similares, basados solamente en variables climáticas o edáficas. El tipo de organismos encargados de la oxidación del AE pueden variar considerablemente, aún dentro de una misma región climática o dominio edáfico. Por ello, y como lo han realizado en algunos países desarrollados (e.g. Nueva Zelanda), es necesario generar modelos locales que permitan conocer el funcionamiento de estas fuentes azufradas, su eficiencia relativa a fuentes sulfatadas solubles y la magnitud de la influencia de los factores edáficos y climáticos locales sobre las respuestas en diferentes regiones agro-ecológicas de la Argentina.

La información y resultados de esta tesis aportan nuevo conocimiento sobre las respuestas a la fertilización con AE, su eficiencia relativa a las fuentes azufradas de uso convencional y su aptitud para ser aplicada como fertilizante azufrado en diferentes cultivos en los agro-ecosistemas pampeanos. Sin embargo, es necesario continuar y profundizar investigaciones tendientes a esclarecer interrogantes no abordados en esta tesis, pero que son muy importantes para generar modelos explicativos y predictivos de las respuestas a la fertilización con este tipo de fertilizantes. Algunos de los interrogantes sobre los cuales es necesario generar información científica son:

- ¿Cuáles son los principales organismos responsables de la oxidación del AE en los suelos pampeanos?. ¿Cómo varía su población y diversidad en diferentes regiones agro-ecológicas?.
- ¿Cuál es la tasa de oxidación del AE para diferentes granulometrías y tipos de suelo? ¿Cómo inciden las variables edáficas y climáticas?
- ¿Cuáles son los mecanismos de pérdidas de S del sistema suelo-cultivo, que pudieran tener influencia en las diferencias en eficiencia del S aplicado a nivel de cultivos y rotaciones?.

Los experimentos diseñados para dar respuesta a estos y otros interrogantes, deberán incluir estudios a diferentes escalas de percepción (e.g. agro-ecosistema, sitio, etc.) y diferente nivel de control de la variabilidad (i.e. experimentos en invernáculo, incubaciones de suelos, experimentos de campo, etc.) dependiendo de las diferencias que es necesario detectar y la variabilidad de los sistemas a cada escala. También resultará de gran utilidad efectuar estudios interdisciplinarios, abordando diferentes aspectos en los mismos experimentos: mediciones microbiológicas y bioquímicas, agronómicas, de fertilidad física y química, etc.